



Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Juho Pyörny

## **Betonin ominaisuudet betonirakenteen valmistusketjun eri vaiheissa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 26.11.2018

Valvoja: Professori Jouni Punkki

Ohjaaja: DI Jukka Viinamäki

---

**Tekijä** Juho Pyörny

---

**Työn nimi** Betonin ominaisuudet betonirakenteen valmistusketjun eri vaiheissa

---

**Maisteriohjelma** Master's Programme in Building Technology

**Koodi** ENG27

---

**Työn valvoja** Prof. Jouni Punkki

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Jukka Viinamäki

---

**Päivämäärä** 26.11.2018

**Sivumäärä** 86 + 25

**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Betonirakentamisen laajasti keskustellut lujuuskato-ongelmat ovat tuoneet esiin tarpeen tarkistaa vaativien betonirakenteiden valmistusketjun hallintaa ja laadunvalvontaa. Tässä diplomityössä on selvitetty betonin ominaisuuksien käyttäytymistä valmistusketjun eri vaiheissa työmaolosuhteissa. Työssä on määritetty vaiheittain betonin laatuominaisuuksien: puristuslujuuden, tiheyden ja ilmamäärän kehittymisen ilmiöitä sekä vaihtelun lähteitä esimerkkikohteessa.

Tutkimuksessa kerättiin kokeellinen aineisto erään betonirakenteen valmistuksen seuranta tutkimuksena betoniasemalla, rakennuspaikalla ja valmiista rakenteesta. Aineisto koostui 194 m<sup>3</sup> betonia, joka valmistettiin 69 valmistuserässä ja toimitettiin työmaalle 21 betonikuormassa. Toteutuneesta rakenteesta porattiin 18 porakoe kappaleen otos.

Betonin toteutunut ilmamäärä on keskeisessä asemassa vaativien olosuhteiden betonirakenteiden säilyvyydessä ja lujuudessa. Tarkastellulla betonilla havaittiin 2,5 % sekoituksessa vapautumatonta ilmamääräpotentiaalia, joka syntyi betoniin uusina huokosina kuljetuksen ja työstämisen aikana. Betonin puristuslujuutta seurattiin valmistusketjun eri vaiheissa valmistetuista koe kappaleista odotetuin tuloksin. Loppurakenteen lujuuden havaittiin vastaavan 85 % työmaakoe kappaleen lujuudesta arvioidussa 28 vrk kypsyys iässä.

Betonin tiheyden hyödyntämistä laadunvalvonnassa todettiin häiritsevän kosteustilan ja mittaus tapojen vertailukelpoisuuteen liittyvät ongelmat. Tiheyden hajonta osoittautui mittaus pisteiden sisällä hyvin hallituksi, mutta vertailukelpoisuus tuoreen ja kovettuneen betonin välillä on heikko. Saadut tulokset ilmentävät tiheyden useiden hajontatekijöitä sekä tiivistyksen vaikutusta betonin tiheyteen. Työmaolosuhteissa betonin tarkka laadunhallinta on haastavaa, sillä käytännöissä on yleisesti hyväksyttyä epätarkkuutta.

Tuloksista tunnistettiin tiivistyksen aiheuttaman erottumisen synnyttämät muutokset betonilaattarakenteen lujuudessa ja tiheydessä. Todennäköistä on, että sementtipastan tilavuusosuus pintakerroksissa on kasvanut ja ilmamäärä kohonnut. Tiheys 300mm paksun laatan yläpinnassa oli keskimäärin 30 kg/m<sup>3</sup> alhaisempi kuin laatan alapinnassa.

Betonin laadunvalvonta pohjautuu oletukseen, ettei betonin koostumus juuri muutu valmistusketjussa valmistuksen jälkeen. Tämä tutkimus kuitenkin todentaa muutoksia valmistusketjun sisällä. Keskustelu laadunvalvonnan kehittämiseksi onkin aiheellista, mutta keskeistä on myös nykyisten määräysten tuntemus ja noudattaminen valmistusketjun eri vaiheissa. Betonirakentamisen hallinnassa ei havaittu huolestuttavia puutteita.

---

**Avainsanat** betoni, laadunvalvonta, valmistusketju, laadunhallinta

---

---

**Author** Juho Pyörny

---

**Title of thesis** Phenomenon of concrete properties within manufacturing chain

---

**Master programme** Building Technology

---

**Code** ENG27

---

**Thesis supervisor** Prof. Jouni Punkki

---

**Thesis advisor(s)** DI Jukka Viinamäki

---

**Date** 26.11.2018

---

**Number of pages** 86

---

**Language** Finnish

---

**Abstract**

The widely discussed strength problems in concrete construction have highlighted the need to review the management and quality control of demanding concrete structure chains. This thesis defines the behaviour of concrete properties at various stages in the manufacturing chain under construction site conditions. In this work, the relevant concrete properties are compressive strength, density and air content considering their development phenomena as well as the sources of variation in the empirical case.

The experimental data was collected as a follow-up study of a concrete structure production at stages of concrete station, site and the hardened structure. The material of the study consisted of 194 m<sup>3</sup> of concrete, made in 69 batches and delivered to the site at 21 concrete trucks. After all, 18 samples were drilled on the hardened structure.

Based on the results, the actual concrete air volume is a major factor to the durability and strength of concrete structures in demanding conditions. In the observed concrete, a non-released 2.5% air volume potential was observed in the mix, which was released during transport and site processing. The compressive strength of the concrete was followed from the test specimens produced at various stages of the production chain with systematic results. The strength of the hardened structure was found to correspond of 85% compressive strength of the site specimen at the estimated 28-day maturity.

Reliability of concrete density was found to interfere with problems of comparability of moisture conditions and measurement methods. Dispersion of density was proved to be under control within the same measuring point, but the comparability between measuring points was found poor. Under concrete construction conditions, precise quality control of concrete was found challenging because there is generally accepted inaccuracy in the practices.

The results showed changes in the strength and density within the concrete slab structure caused by the material segregation. It was found likely that the volume of the cement paste and the air volume in the top-surface layers was increased. The density of the 300 mm concrete plate on the top-surface was on average 30 kg/m<sup>3</sup> lower than the bottom surface.

The regulation of concrete quality control is now days built on the assumption that the composition of the concrete is not changing within the manufacturing chain after manufacturing process. The results of this study verify changes in the manufacturing chain and so provide a basis for further conversation. It is also essential to know and obey the current regulation at various stages of the manufacturing chain. The study found no issues to doubt the quality of concrete construction more widely.

---

**Keywords** concrete, quality control, manufacturing chain,

---

## Alkusanat

*Tämän tutkimukseni sisällöllä pyrin omalta osaltani tuottamaan havaintoja ja vastauksia ajankohtaisiin betonirakentamisen laadunvarmistukseen liittyviin huoliin sekä yhdistämään henkilöinen kokemukseni betoniaseman toiminnasta, betonoinnista työmaalla ja betonitekniikan opinnoista uutta kokemusperäistä tietoa tuottavaksi valmistusketjun seuranta tutkimukseksi.*

*Yleisesti haluan kiittää YIT Rakennus Oy:tä ja Tripla-hankkeen sekä Pasilan aseman työmaan johtoa (Pekka Luukkonen, Jani Kuivamäki, Teemu Kangaskoski, Teppo Viitasalo) opintojen ja tutkimuksen eri työvaiheiden mahdollistamisesta ja positiivisesta kannustuksesta projektin loppuunsaattamiseksi.*

*Tutkimuksen joustavasta ja aina asiaan keskittyvästä hyvästä ohjauksesta sekä ymmärryksestä tutkimuksen toteuttamisessa vakituisen työn rinnalla haluan kiittää Professori Jouni Punkkia (Aalto-yliopisto) ja DI Jukka Viinamäkeä (YIT Rakennus Oy). Asiantuntevista näkemyksistä lisäksi kiitos DI Vesa Anttilalle (Ruskon Betoni Oy).*

*Tutkimuksen läpiviemiseksi tehtiin hyvää yhteistyötä ja jaettiin asiantuntemusta betonirakentamisen eri osapuolien välillä. Valmisbetonitoimittaja Ruskon Betoni Oy:n puolesta projektissa apuna ja tukena toimivat Jukka Tuohino, Jere Toivonen, Petri Valkonen, Miikka Piispanen ja Harri Haimi. Kiitos myös yhteistyöstä porakoekappaleiden käsitelyssä ja koeistamisessa Jarkko Klamille (VTT Expert Services Oy) ja Fahim Al-Neshawylle (Aalto-yliopisto) sekä tuesta betonin kypsyysikäarviossa Sini Ruokoselle (Finnsementti Oy).*

*Kaikki hyvä loppuu aikanaan. Diplomi-insinööri Pyörnyn opinnot eivät valmistuneet ennen Länsimetroa, mutta omaksi onnekseen ennen uutta uljasta Pasilan rautatieasemaa. Lämmin kiitos myös kaikille kavereille, perheelle ja Sadulle tuesta sekä kannustuksesta projektissa!*

*Tarkasteltu paikallavalurakenne on tässä tutkimuksessa todettu laadukkaasti toteutetuksi osaksi YIT Rakennus Oy:n Keski-Pasilan Tripla -hybridihanketta ja Helsingin uuden sydämen Pasilan joukkoliikennekannen rakenteita.*

Helsinki 26.11.2018

*Juho Pyörny*

Juho Pyörny



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

1	Johdanto .....	6
1.1	Tausta .....	6
1.2	Tavoitteet ja rajaus .....	7
1.3	Tutkimusmenetelmä .....	8
1.4	Työn rakenne .....	9
2	Betonirakenteen valmistusketju .....	10
2.1	Betoni materiaalina .....	10
2.2	Laatuketju .....	11
2.3	Betoniaseman toiminta .....	12
2.3.1	Jatkuva laadunvarmistus betoniasemalla .....	15
2.4	Betonin kuljetus .....	15
2.5	Rakenteen betonointi työmaalla .....	16
3	Betonin ominaisuudet .....	17
3.1	Betonin perusyhtälö .....	17
3.2	Otoskeskihajonta .....	17
3.3	Betonin tiheys .....	17
3.4	Betonin huokoisuus ja ilmamäärä .....	20
3.5	Ilmamääräpotentiaali .....	22
3.6	P-Lukumenettely .....	23
3.7	Betonin puristuslujuus .....	24
3.8	Puristuslujuuden määrittäminen valmiista rakenteesta .....	27
4	Seurantatutkimus: Case Pasilan asemakansi .....	29
4.1	Tarkasteltava rakenne .....	29
4.2	Tutkimussuunnitelma .....	31
4.2.1	Toiminta betoniasemalla .....	32
4.2.2	Toiminta työmaalla .....	33
4.2.3	Toiminta rakennekoekappaleiden valmistamiseksi .....	34
4.3	Rakenteen kypsyysikä ja poranäytteiden puristusajankohta .....	36
4.4	Poranäytteiden puristuslujuuden koestus .....	38
4.5	Painekyllästyskappaleen tiheyden ja ilmamäärän määrittäminen .....	40
5	Tutkimustulokset .....	42
5.1	Betoniaseman tuoreen betonin laadunvalvonta .....	42
5.2	Työmaan tuoreen betonin laadunvalvonta .....	47
5.3	Laadunvalvonnan normikoekappaleet .....	49
5.4	Valmiista rakenteesta poratut rakennekoekappaleet .....	51
5.4.1	Rakennekoekappaleiden puristuslujuus .....	51
5.4.2	Rakennekoekappaleiden ilmamäärä .....	52
5.4.3	Rakennekoekappaleiden tiheys .....	53
5.4.4	Rakennekoekappaleiden raudoitusterästen huomioiminen .....	54
6	Tulosten arviointi .....	55
6.1	Ilmamäärän muutokset valmistusketjussa .....	55

6.2	Puristuslujuuden muutokset valmistusketjussa .....	58
6.3	Rakenteen vaatimuksenmukaisuuden toteaminen.....	60
6.4	Tiheyden kehitys valmistusketjussa .....	61
6.5	Tiheyden määrittämiseen liittyvät virheet.....	63
6.5.1	Kyllästysasteen vaikutus tiheyteen käytettäessä todellisia mittoja.....	64
6.5.2	Ilmamääräastian täyttäminen tai tiivistäminen .....	65
6.5.3	Normikoe-kappale-ierion mittatarkkuus .....	66
6.5.4	Kovettuneen betonin koe-kappaleen mittaaminen .....	67
6.6	Betonilaatan poikkileikkauksen ylä- ja alapinnan tulokset.....	68
7	Yhteenveto .....	71
7.1	Seurantatutkimuksen toteuttamiseen liittyviä haasteita .....	73
7.2	Ehdotukset jatkotutkimuksen aiheista.....	73
8	Lähdeluettelo .....	74
Liitteet		

Liite 1. Tallennetut lämpötilaolosuhteet. 3 sivua.

Liite 2. Näytteenottopisteet. 1 sivua.

Liite 3. Luettelo rakennekoekappaleista. 1 sivua.

Liite 4. Valmisketjun eri vaiheissa määritetyt tiheydet. 1 sivua.

Liite 5. Laadunvalvontapöytäkirjat. 20 sivua.

## **Merkinnät ja lyhenteet**

MPa	[N/mm <sup>2</sup> ]	megapascal, puristuslujuuden yksikkö
nm		nanometri
µm		mikrometri
mm		millimetri
BY		Suomen Betoniyhdistys ry
RIL		Rakennusinsinööriliitto
RT		Rakennusteollisuus
SFS		Suomen Standardoimisliitto SFS ry
LiVi		Liikennevirasto

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Suomalaisen betonirakentamisen laadusta ja työvirheistä on keskusteltu vuosina 2016-2018 aiempaa laajemmin ja myös yhteiskunnallisella tasolla rakennusalan ulkopuolella. Laatu-putteita on havaittu erityisesti vaativissa rakenteissa, joissa on käytetty voimakkaasti notkistettua, pakkas-suolakestävää betonia.

Keskustelu käynnistyi loka-marraskuussa 2016, kun Kemijärvellä junaradan alikulkusilta jouduttiin purkamaan ja rakentamaan uudelleen, koska sillan betonirakenteet eivät yllättäen kestäneet rakenteille suunniteltua jälkijännitystä. Samoina aikoina Turussa sekä parkkihallityömaalla ja sairaalatyömaalla työt keskeytyivät betonirakenteiden laatuongelmiin. Sairaalan osalta yksittäisestä tiivistysvirheestä paljastuneet ongelmat johtivat rata- ja tiealueelle rakennettujen perustusten purkutöihin ja koko työmaan myöhästymiseen. Betonivalmistajan omavalvonta oli tapauksissa tehty määräysten vaatimalla tavalla, mutta valmiista rakenteista havaittiin noin kaksinkertaisia betonin ilmamääriä. Valmistusketjussa oli tapahtunut jotakin yllättävää. (Mäkikyrö 2017)

Havaintojen vuoksi Rakennusteollisuus (RT), alan toimijat ja viranomaiset käynnistivät useita selvityksiä, joiden valmistuessa keskustelu betonin laadusta on säilynyt ajankohtaisena. Aalto-yliopistossa toteutettiin laajana yhteistyöhankkeena Robust Air-tutkimus, jonka lopputuloksena betonin lisäaineiden yhteensopimattomuus ja hidas toiminta voidaan todeta yhdeksi ongelmien keskeisistä syistä (Al-Neshawy & Punkki 2017).

Rakennusteollisuuden (RT) kutsumana ulkopuolinen selvitysmies Tapani Mäkikyrö pyrki muodostamaan kokonaiskuvan tilanteesta kuulemalla alaa laajasti. Mäkikyrö esitti arviot marraskuussa 2017, että osaamista ja toimintaa olisi kehitettävä koko betonirakentamisen laatuketjussa rakennuttamisessa, betonin valmistamisessa ja työmaalla. Rakentaminen on kustannuskeskeistä, eikä kaikkea määriteltä valvontaa aina tehdä. Laadunvalvontaohjeistukset poikkeavat toisistaan talonrakennus- ja infrakohteissa, eikä nykylaajuus edellytä valvontaa kaikista valmistuseristä. Rakenteiden vaatimuksenmukaisuus osoitetaan valmistuksen valvonnalla, eikä valmiita rakenteita tarvitse tutkia. Betonivalmistajat eivät ole täysin hallinneet uusien notkistavien ja huokostavien lisäaineiden käyttäytymistä kuljetuksessa, eikä ennakko-kokeita tehdä riittävästi. Työmaan laadunvalvonnassa liikaa ilmaa sisältävä betonia ei välttämättä tunnisteta. Mäkikyrö totesi myös, että keskusteluyhteys suunnittelun, betonivalmistajan ja työmaan välillä on useimmiten vähäistä. (Mäkikyrö 2017).

Liikennevirasto tutki talvella 2016-2017 lujuutta ja ilmamäärää yhteensä 18 maantiesillasta, jotka oli rakennettu vuosina 2011–16. Yhteensä kuudella sillalla betonin puristuslujuustuloksissa oli epäselvyyksiä ja siten puutteiden määrä oli tutkimuksen laajuuteen nähden suuri. Yllättävien tulosten vuoksi Liikennevirasto teetti lisätutkimuksia vilkasliikenteisille betonisilloille ympäri Suomen. Kesällä 2017 tutkituista yhteensä 94 betonisillasta vain yksi ei täyttänyt asetettuja vaatimuksia. Oulu-Kemi -radan Kuivajoentien sillan betoninäytteiden ilmamääräksi havaittiin jopa 12 % ja sillan lujuudeksi vain 78 % tavoitellusta (30/45 MPa). Silta oli rakennettu samana ongelmahavaintojen vuonna 2016 kuin aiemmin havaitut lujuuskato-tapaukset. Toiminnallisesti silta kuitenkin todettiin turvalliseksi nykyisessä käyttötarkoituksessaan. (Liikennevirasto 2018).

Yhtenä kehitysvaihtoehtona Liikennevirasto on selvittänyt tiheyden hyödyntämistä osana siltojen laadunvalvontaa. Betonin valmistuksesta, kuljetuksesta ja betonoinnissa tiheyteen syntyvää hajontaa ei kuitenkaan tunneta, eikä prosessia ole riittävästi tutkittu. Mikäli betonin tiheyden vaihteluvälejä tunnettaisiin paremmin, alalla olisi edellytykset sopia raja-arvoista, joiden ylittyminen rakennuspaikalla aiheuttaisi betonierän hylkäämisen tai johtaisi muuten lisätutkimuksiin. (Punkki 2017).

## 1.2 Tavoitteet ja rajaus

Tämän diplomityön tavoitteena on osaltaan arvioida valmistusketjun toimintaa vaativan betonirakentamisen eri vaiheissa, erityisesti laadunhallinnan näkökulmasta. Tavoitteena on seurata ja tunnistaa betonin laatuominaisuuksien: puristuslujuuden, tiheyden ja ilmamäärän kehittymisen ilmiöitä, suuruusluokkia ja vaihtelun lähteitä. Tulosten perusteella on tavoite laatia suosituksia rakennushankkeen eri osapuolille betonirakentamisen laadun kehittämiseksi.

Keskeiset tutkimuskysymykset ovat:

1. Kuinka betonin ominaisuudet kehittyvät valmistusketjun aikana ja voidaanko näille esimerkitapauksen perusteella tunnistaa luotettavia trendejä?
2. Millaista luonnollista vaihtelua (hajontaa) betonin valmistuksessa, kuljetuksessa ja työmaalla esiintyy?
3. Kuinka hyvin betoniasemalla tai työmaalla valmistettu koekappale vastaa rakenteesta poratun koekappaleen ominaisuuksia?
4. Voidaanko betonilaatan poikkileikkauksessa havaita erottumisen aiheuttamia muutoksia porattujen rakennekoekappaleiden ominaisuuksien perusteella?
5. Miten betonin laadunvalvontaa olisi perusteltua ja tehokasta kehittää?

Työn painopiste on kokeellisessa seurantatutkimuksessa, jossa yhden betonirakenteen valmistuksesta kerätään tavanomaista enemmän tietoa ja valmistuseriä seurataan laajennetuilla laadunvarmistuskokeilla valmistusketjun eri vaiheissa betoniasemalla, työmaalla rakennuspaikalla ja valmiista rakenteesta.

Tutkimuksessa pyritään vastaamaan Liikenneviraston tilaamassa raportissa ”Betonin tiheyden hyödyntäminen laadunvalvonnassa siltapaikalla” (Punkki 2017) esitettyihin jatkotoimenpiteisiin betoniin tiheyteen valmistuksesta ja työmaalla syntyvän hajonnan selvittämiseksi.

Tämä työ tuottaa tietoa betonin laatuominaisuuksien vaihteluista käytännön rakentamisessa. Tutkimuksessa hyödynnetään betonin normaalia laadunvalvontaa ja erikseen sovittuja laajennuksia siten, että merkittäviä lisäkustannuksia aiheuttavat lähinnä tutkimuksen pora-koekappaleet, niiden analysointi ja rakenteiden korjaaminen.

Tässä Diplomityössä kaikki työmaamäärytykset tehdään reaalissa betoniasema- ja työmaaolosuhteissa, joten saatujen tulosten voi arvioida kuvaavan tavanomaista hyvää käytännön rakennustapaa. Työmaalla valmistelut ja poratut koekappaleet on vastaavasti testattu laboratorioolosuhteissa, jotka on kunkin tuloksen kohdalla mainittu erikseen (Ruskon Betoni Oy/Tuusula, Aalto-yliopisto/Otaniemi ja VTT Expert Services Oy/Otaniemi).

### 1.3 Tutkimusmenetelmä

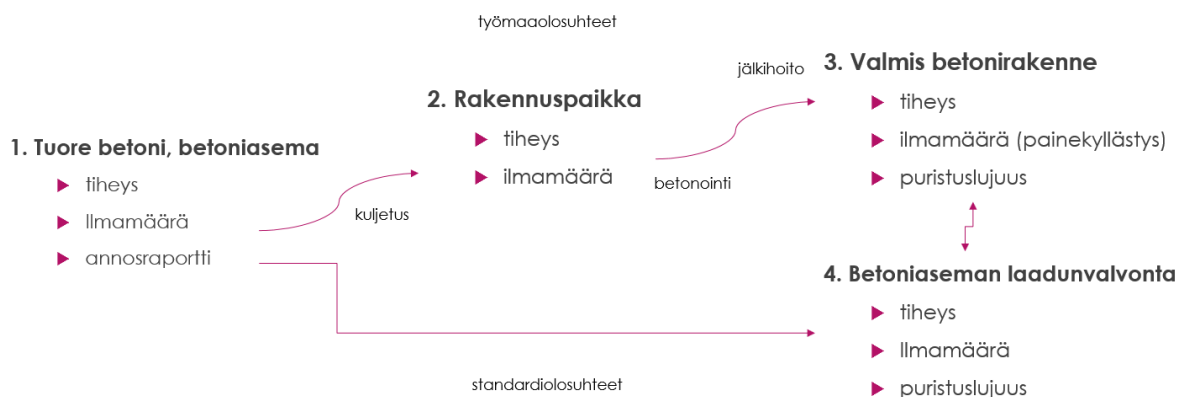
Tämän työn tavoitteisiin pyrittiin vastaamaan toteuttamalla betonirakenteen valmistuksen seurantatutkimus betoniasemalla, rakennuspaikalla ja valmiista rakenteesta. Betonin tarkasteltavia ominaisuuksia ovat tiheys, ilmamäärä ja puristuslujuus sekä näiden määrittämiseen liittyvät suureet (kuva 1). Kokeellista tutkimusta tukee kirjallisuusselvitys, jonka avulla esitellään lukijalle tulosten tulkintaan tarvittavat käsitteet ja betonitekniset perusteet. Kirjallisuusselvityksellä peilataan seurantatutkimuksen tuloksia tutkimusmenetelmien rajoituksiin, ominaisuuksiin ja aiempaan tietoon betonin hajonnasta valmistusketjun eri pisteissä. Selvityksen lähteitä ovat eurooppalaiset betonivalmistuksen standardit, laadunvalvontaohjeistukset, suunnitteluohjeet ja betonialan kansalliset sekä kansainväliset julkaisut.

Tutkimuksen aineisto koostui 194 m<sup>3</sup> betonia, joka valmistettiin 69 valmistuserässä ja toimitettiin työmaalle yhteensä 21 betonikuormassa. Tarkasteltava betonilaatu oli suojahuokostettu P-lukubetoni P-30 Ro20R2 C35/45. Rakenteessa sovellettiin Liikenneviraston ohjeita betonirakenteiden laadunvalvonnasta.

Tutkimuksen ajaksi myös betoniaseman omaa laadunvalvontaa lisättiin siten, että jokaiselle tarkasteltavalle betonikuormalle löytyisi vertailutulos tuoreen betonin ominaisuuksista sekä betoniaseman oma normipuristuskoeappale. Aineisto kerättiin yhdessä betonitoimittajan betoniaseman prosessienhoitajien sekä laboranttien kanssa. Betonitoimittaja luovutti tutkimukseen valmistettujen betonikuormien suhteutukset ja valmistuksen annosraportit.

Tässä tutkimuksessa betonin valmistuspaikka sijaitsi työmaa-alueella ja kuljetusmatka työmaalle oli noin 5 min. Lyhyt kuljetusmatka ei välttämättä tuo esiin kaikkia potentiaalisia muutoksia betoniin kuljettamisessa, mutta mukana ovat useat prosessin vakiovaiheet (sekoitus betoniasemalla valmistuksen aikana, sekoitus purettaessa kuormaa työmaalla, pumppaus ym). Kuljetuksen aikana betonia ei kuitenkaan lähtökohtaisesti sekoiteta riippumatta kuljetusmatkan pituudesta. Betonin seisonaa simuloivaa erillistä koejärjestelyä ei toteutettu. Betonointityö sujui tutkimuksen aikana ongelmitta.

Tutkimusaineistosta määritettiin vaiheittain tilastollisia ominaisuuksia ja seurattiin muutoksia valmiserästä edetessä valmistusketjussa. Tulosten tilastollista merkitsevyyttä arvioidaan soveltuvin osin.



Kuva 1 Betonirakenteen valmistusketju ja tässä työssä arvioitavat betonin ominaisuudet

## 1.4 Työn rakenne

Työn toisessa luvussa käsitellään betonirakenteen valmistamista ja esitellään myös kirjallisuuden, haastattelujen ja selvityskäyntien perusteella esimerkkibetoniaseman toimintoja, tarkkuutta ja betonirakenteen toteuttamista työmaaolosuhteissa.

Kolmannessa luvussa esitellään kirjallisuuden pohjalta yleisesti käytössä olevia betonista määritettäviä laatuominaisuuksia, laadunvalvontaa valmistuksen eri vaiheissa ja ohjeita puristuslujuuden sekä vaatimuksenmukaisuuden selvittämiseen valmiista betonirakenteesta. Tässä luvussa esitellään Liikenneviraston P-Lukumenettely, joka on vaativia siltarakenteita varten kehitetty laadunhallintaohjeistus.

Neljännessä luvussa on esitelty yksityiskohtaisesti tarkasteltava rakenne, toteutetun seurantatutkimuksen tutkimussuunnitelma ja kohteen betonille asetetut vaatimukset. Tässä luvussa on käsitelty talviolosuhteiden ja rakenteen kypsyysian huomointia tutkimuksessa. Neljännessä luvussa esitellään tarkkaan myös käytetyt koejärjestelyt mm. porakoekappaleille tehdyn painekyllästyskokeen osalta.

Viidennessä luvussa on vaiheittain esitelty keskeiset koetulokset koskien betonin tiheyttä, ilmamäärää ja puristuslujuutta edeten valmistusvaiheissa kronologisessa järjestyksessä.

Kuudennessa luvussa arvioidaan saatuja koetuloksia suhteessa tutkimusoletuksiin ja kirjallisuuden viitetuloksiin. Tässä luvussa käydään läpi tulosten luotettavuutta, erityisesti tiheyden mittaamiseen liittyviä virhelähteitä ja koejärjestelyn parannuskohteita. Kuudennessa luvussa on arvioitu saatujen tutkimustulosten perusteella kovettuneen rakenteen poikkileikkauksessa tapahtunutta erottumista ja rakenteen vaatimuksenmukaisuutta.

Viimeisessä luvussa esitetään tutkimuksen yhteenveto ja johtopäätökset sisältäen havaintoja betonin valmistusketjun laadunvarmistuksen toiminnasta ja ehdotukset aiheen jatkotutkimustarpeista.

## 2 Betonirakenteen valmistusketju

### 2.1 *Betoni materiaalina*

Betoni on keinotekoisista kiveä, joka koostuu pääosin materiaalin runkona toimivasta kiviaineksesta ja sementistä sekä vedestä muodostuvasta sementtipastasta. Kaikkien osa-aineiden keskinäistä seossuhdetta kutsutaan suhteutukseksi, joka määrittää pääosin sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuudet.

Betonin kiviainekseksi tarvitaan tiivis ja luja materiaali, joka on tavallisesti luonnon muovaama kiviaines tai murskattu kalliokiviaines. Kiviaineena voidaan käyttää esim. myös savesta valmistettua kevytsoraa tai uusiokäyttöön murskattua betonia. Toimiva betonisuhteutus sisältää kaikenkokoista kiviainesta siten, että rakenteesta muodostuu mahdollisimman tiivis ja yhtenäinen kiviaineksen yhteenliittävän sementtipastan kanssa. Mitä parempi on suhteutuksen kiviaineksen jatkuvuus (rakeisuuskäyrä), sitä vähemmän betoniin jää tyhjää tilaa ja huokoisuutta.

Sementti on kalkkikivestä jauhamalla 1-50 µm särmikkääksi pulveriksi valmistettu hydraulinen sideaine, johon on korkeassa lämpötilassa polttamalla varastoitu energiaa. Sementin energia vapautuu betonin valmistuksen alkaessa kalsiumyhdisteiden (C3S, C2S, C3A, C4AF) ja veden hydrataatioreaktiossa. Sementillä laadulla, hienoudella ja määrällä on keskeinen vaikutus betonin lujuuteen, lämmönkehitykseen ja säilyvyysominaisuuksiin. Yleisesti käytettyä portlandsementtiä voidaan korvata myös muilla vastaavilla sideaineilla: masuunikuonalla, lentotuhkalla tai silikajauheella. (Mehta & Monteiro 2014).

Betonissa käytetään myös lisä- ja seosaineita (muita kuin kiviainesta, vettä ja sementtiä), joilla voidaan vaikuttaa betonin työstettävyyden, säilyvyyteen tai valmistuksen kustannuksiin. Betonin valmistusta ja raaka-aineiden vaatimuksia ohjaa ensisijaisesti eurooppalainen standardi EN 206-1. Suomessa vaatimukset on koottu lisäksi yhteen Suomen Betoniyhdistys ry:n julkaisuun Betoninormit (voimassa BY 65 Betoninormit 2016).

**Taulukko 1 Esimerkki P30 Ro20 R2 C35/45 #16 - betonin raaka-aineista (valmistuserä 17952.1)**

Osa-aine	Tilavuusosuus [%]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
Kiviaines 0-8 mm	37,7 %	2700	1041
Kiviaines 8-16 mm	29,1 %	2700	802
Sementti (SR)	12,5 %	3100	391
Vesi	16,5 %	1000	162
Lisäaineet	0,5 %	1,1-1,2	5
Ilma	4,0 %	0	0

Betoni on materiaalina raskasta ja normaalin betoni tiheys on tyypillisesti 2400 kg/m<sup>3</sup> (Mehta & Monteiro 2014). Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto tässä tutkimuksessa tarkastellun betonin osa-aineista.

Betonin käyttö yhteiskuntien keskeisenä rakennusmateriaalina kuluttaa merkittävästi luonnonvaroja. Betonin valmistamisen edellyttämä sementin tuotanto käyttää yli 90 % betonirakenteen valmistuksen kuluttamasta energiasta ja maailman sementin tuotanto vastaa 5 %

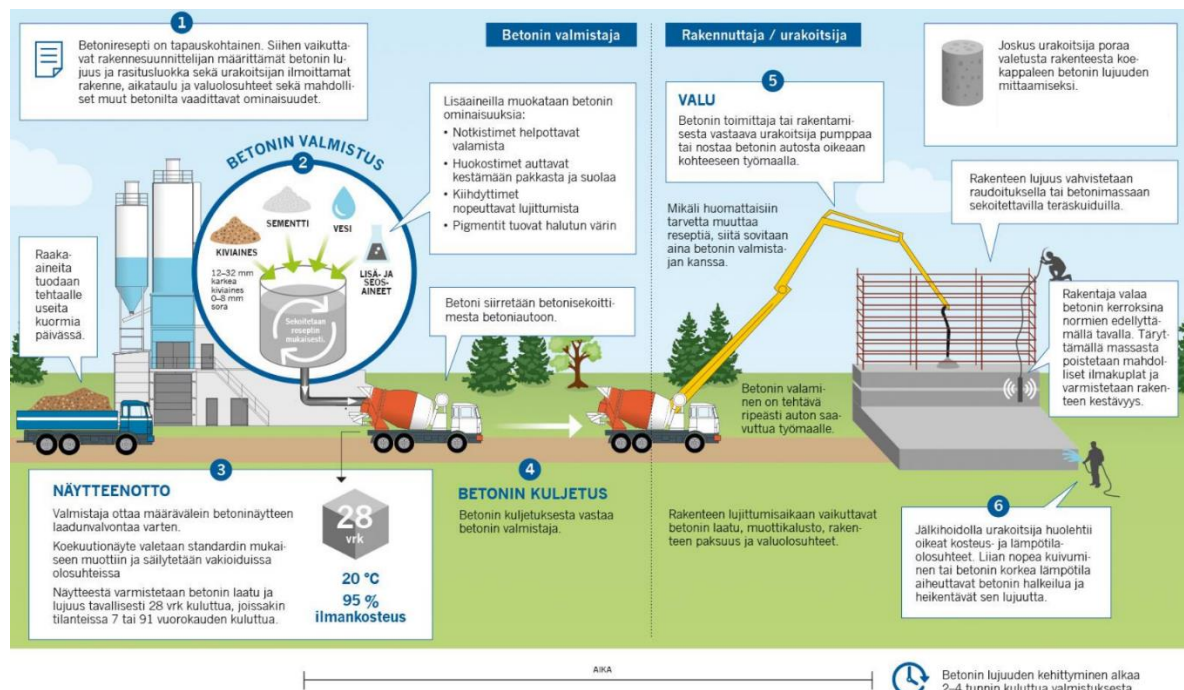


kaikista hiilidioksidipäästöistä. (BY 2018). Ympäristön kannalta tilanne on erittäin haastava, sillä sementin tuotanto on maailmassa kasvanut 5 % vuosittain ja nelinkertaistunut vuodesta 1990 (Mehta & Monteiro 2014). Betonirakentamisen energia ja päästövaikutuksia voidaan pienentää kehittämällä sementin valmistusta ja käyttämällä valmistuksessa sementtiä korvaavia energiatehokkaampia seosaineita esim. teollisuuden prosessien sivuvirroista. Seosaineet voidaan sekoittaa sementtiin jo sementtitehtaalla, jolloin puhutaan seossementistä. Suhteutuksella ja sementtivalinnalla voidaan vaikuttaa betonin ympäristövaikutuksiin.

## 2.2 Laatuketju

Laadukas betoni täyttää sille määritellyt tekniset ja toiminnalliset vaatimukset koko suunnitellun käyttöikänsä ajan: 50, 100 tai 200 vuotta. Rakennusten näyttävä arkkitehtuuri ja entistä haastavammat rakennuspaikat ovat korostaneet aiempaa keskeisempää rooliin betonin laadun ja säilyvyysominaisuudet eri ympäristöolosuhteita ja vaurioitumismekanismeja vastaan. Betonin ominaisuudet voivat heikentyä useissa valmistusketjun eri vaiheissa ja näitä vaiheita on esitetty kuvassa 2. Laatuketjulla tarkoitetaan laatuun vaikuttavien tekijöiden ketjua valmistuksen aikana. Kaikki rakentamisen osapuolet: suunnittelija, tilaaja, betonivalmistaja ja työmaa vaikuttavat toiminnallaan syntyvän lopputuotteen ominaisuuksiin ja laatuun. Betonin laatuun liittyvät myös oikeaoppinen betonin tiivistys ja jälkihoito osana laatuketjua.

Betonin vakiintuneita mitattavia ominaisuuksia betonirakenteen valmistusketjun aikana ovat puristuslujuus, ilmamäärä, tiheys ja notkeus (painuma, leviämä, Vebe). Notkeus vaikuttaa betonin työstettävyyteen työmaalla ja erityisesti tiheästi raudoitetun rakenteen betonoinnin onnistumiseen. Edellytettävä notkeus yhdessä varsinaisten teknisten ominaisuuksien kanssa määrittää käytettävän betonin suhteutuksen, sillä notkeus on riippuvainen betonin vesi-sementtisuhteesta, notkistavista lisäaineista ja runkoaineen rakeisuuden sopivasta jakaumasta suhteutuksessa. Notkeudella on oleellinen vaikutus betonin muiden ominaisuuksien pysyvyyteen ja työstämisen aikaiset ongelmat voivat kasvaa notkeilla betonilaaduilla (BY 2018).



Kuva 2 Betonirakentamisen laatu syntyy monen toimijan ketjussa (Rakennusteollisuus 2017)

### 2.3 Betoniaseman toiminta

Betoniasema on valmistuslaitos, jossa betonin raaka-aineet sekoitetaan ennen betonointia työmaalla. Betoniasema voidaan teknisesti toteuttaa useilla kilpailevilla ratkaisuilla, kunhan sen annostelutarkkuus ja aseman tuottaman betonin laatu ennakkokokeissa täyttää eurooppalaisessa standardissa EN 206 asetetut vaatimukset.



Kuva 3 Esimerkki betoniaseman kokoonpanosta (Pyörny)

Betoniaseman toiminnot voidaan ryhmitellä neljään osaan: raaka-aineiden vastaanotto ja varastointi, raaka-aineinen annostelu ja kuljettimet sekoittimeen, betonin sekoitus ja prosessin ohjaus sekä jatkuvat laadunvalvontatoimet. Näitä toimintoja esitellään tässä työssä Helsingin Pasilassa sijaitsevan esimerkkiprojektiaseman kautta (kuva 3). Betoniasemaa koskevat huomiot perustuvat vierailuihin betoniasemalla ja asemahenkilökunnan kanssa käytyihin keskusteluihin. Punaisessa rakennuksessa sijaitsevat kiviaineen vastaanotto, -kuljettimet ja betonisekoitin. Keltaiset siilot ovat varasto sideaineille. Prosessinohjaus ja työmaalaboratorio sijaitsevat taustalla näkyvissä vaaleissa kopeissa.

Betonin valmistus tapahtuu usein kaupunkien laitamille perustetuilla teollisuusalueilla, joista on hyvä logistiset yhteydet eikä tuotannon aiheuttama melu- ja pölyhaitta aiheuta häiriötä asumiselle. Sementin hydrataatioreaktiot alkavat pian betonin osa-aineiden sekoituksesta, joten betoniaseman sijainti vaikuttaa yksikön palvelualueeseen, joka tavallisesti on 30-50 km. Sementin hydrataation sitoutumisvaihe kestää tavallisesti 2-4 tuntia, minkä aikana betonia voidaan kuljettaa vaikuttamatta lopputuotteen teknisiin ominaisuuksiin.

Mittavia paikallavalettavia betonirakenteita sisältäville työmaille valmisbetonivalmistajat ja rakennusliikkeet voivat yhteistyössä perustaa projektikohtaisia betoniasemia kuten tämän tutkimuksen kohteessa. Työmaalle sijoitetulla betoniasemalla voidaan vähentää betonin kuljetuksiin kuluva aikaa, toimitushäiriöitä ja kuljetusajan vaikutusta betonin laatuun. Työmaa-aseman lupaprosessit, hankkiminen, rakentaminen ja vaadittavat ennakkokokeet edellyttävät taloudellisesti merkittävää, esim. yli 100 000 m<sup>3</sup> valmistettavia betonituotantoa.



**Kuva 4 Esimerkki betoniaseman kiviaineiden vastaanotosta (Pyörny)**

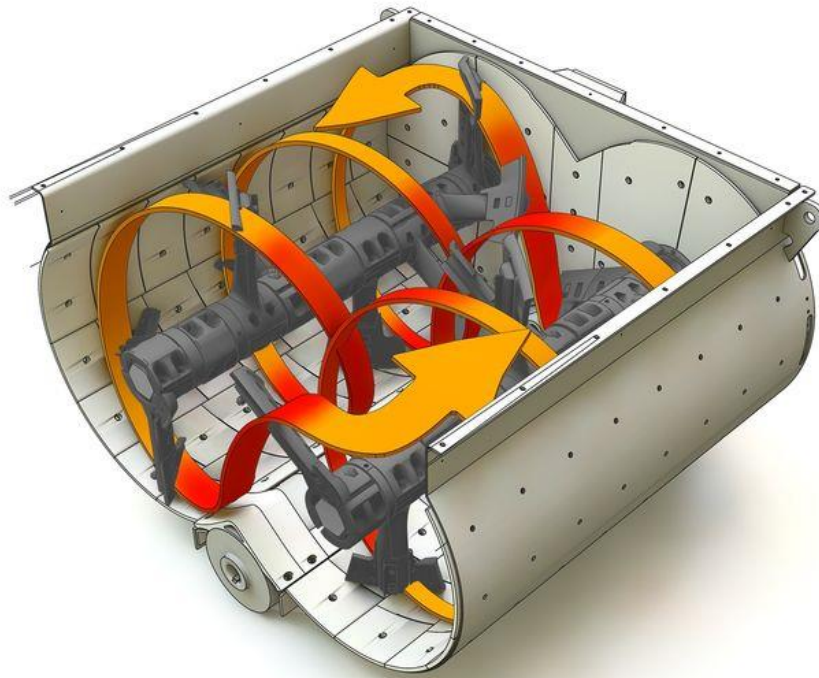
Esimerkkibetoniasemalla kiviaineet vastaanotetaan annostelusiiloihin tai välivarastoon betoniaseman pihalle, mistä ne siirretään pyöräkuormajalla annostelusiiloon (kuva 4). Kiviainestoimittaja vastaa CE-merkityn kiviaineksen seulonnasta viikoittain ja toimittaa rakeisuustiedot sekä muun laatutiedon raaka-aineesta betonivalmistajalle. Kiviaines on usein varastoituna ulkotiloissa, joissa sen kosteus vaihtelee ulkoilman kosteuden ja mahdollisen vesisaateen mukaisesti. Kiviaineksen kosteus on siksi tekijä, joka vaihtelee valmistuksen aikana. Itse kiviainesten laatu voi myös vaihdella hankintasopimuksissa määritellyissä vaihteluväleissä, mutta käytännössä vähäisissä määrin. Tässä työssä kiviaines on oletettu tasalaatuiseksi.

Runkoaineet punnitaan kelluvalle vaa-alle, josta hihnakuuljetin siirtää annoksen väliastiaan. Väliastia nostetaan mekaanisella hissillä aseman betonisekoittimen yläpuolelle ja tyhjenetään seuraavassa annostelussa. Kiviainesten punnituksessa tapahtuu tasaisesti vaihtelua tavoitellun annostelutarkkuuden rajoissa, jotta asemalla saavutetaan järkevä tuotantonopeus.

Sementti ja muut sideaineet annostellaan aseman siilojen alapäässä sijaitsevien ruuvikuljetinien avulla betonisekoittimeen. Sideaineet ovat CE-merkittyjä ja ne toimitetaan asemalle tankkiautolla, josta kuorma paineilmalla puhaltaen siirretään siilon päälle. Sideaineruuvien toimintaan vaikuttavat paineentasausventtiilit ja suodattimet siilon yläpäässä. Siilon seisonta käyttämättömänä voi aiheuttaa sideaineen pakkautumista ja haasteita annosteluun.

Tarkastellulla betoniasemalla käytössä on erillinen lisäainekontti, jossa käytettävät lisäaineet varastoidaan käytettävän seossuhteen mukaan laimennettuna vedellä. Lisäaineet pumpataan suoraan myllyyn. Annosteluun tarvittava vesi tulee korkeapaineisena myllyn katon suuttimiin, joista se sumutetaan annostelun alussa. Järjestelmä aloittaa annoksen sekoitusajan laskennan vesiannostelun päätyttyä.





**Kuva 5 Esimerkki kaksiakselinen betonisekoittajasta (BHS-Sonthofen GmbH tuotekatalogi)**

Betoniannosta on sekoitettava sekoitinmallista (kuva 5), käytettävästä sekoitustehosta ja valmistettavasta betonista riippuva aika. Riittävällä sekoitusajalla ja teholla varmistetaan osainsekoittuminen ja hydrataation käynnistyminen tasaisesti betonimassassa. Lyhyen sekoitusajan on todettu heikentävän betonin lujuutta. Vaikutus oli eräässä tutkimuksessa merkittävä alle yhden minuutin sekoitusajoilla, kun taas kahden minuutin jälkeen vaikutusta ei enää havaittu. (Neville 1995, s. 211). Sekoitusaajan valinnassa betonivalmistajan on huomioitava käytettävät lisäaineet ja suhteutus. Minimisekoitusaikana käytetään 60 sekuntia. Käytännössä sekoitusajan valinta perustuu valmistajan kokemukseen ja massan ennakkokoe tuloksiin.

Valmisbetonille ei ole olemassa eurooppalaista harmonisoitua EN-tuotestandardia, joten betonille ei voida käyttää muuten rakentamisessa yleisesti käytössä olevaa CE-merkintää. Alalla on päätetty noudattaa EN-standardia EN 206. Valmistukselle voidaan myöntää eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksyntälain mukainen varmennustodistus, jonka perusteena on viranomais määräysten- ja ohjeiden noudattaminen. (Laki 21.12.2012/954).

Valmistettavan valmisbetonin Betoninormien (BY 65 2016) puristuslujuuden vaatimuksen mukaisuus on todennettava kolmannen osapuolen säännöllisellä tarkistuksella. Tällöin kyseessä on tarkastettu valmisbetonin valmistus. Kaikki valmisbetonituotanto ei ole tarkastettua. Betonin valmistus on sertifioitua, mikäli betonitehdas on Ympäristöministeriön hyväksymän tarkastuslaitoksen alaisessa valvonnassa (esimerkiksi Kiwa Inspecta Sertifiointi Oy). Tarkastuskäynnit tehdään kahdesti vuodessa ja niillä tarkastetaan betoniaseman tuotantolaitteet, henkilöstön pätevyys, laboratoriolaitteet ja jatkuvan laadunvarmistuksen tulokset sekä riittävä laajuus.

### 2.3.1 Jatkuva laadunvarmistus betoniasemalla

Suomessa betonitehtaat pääsääntöisesti kuuluvat varmennustodistusmenettelyn piiriin, jolloin betonin valmistaja itse huolehtii toimittamansa betonin laadusta EN 206 määräysten mukaisesti ja kaikki normaalibetonin laadunvalvonta tapahtuu betonitehtaalla. Kun betonin valmistus on siirtynyt tuotannon aloittamisen jälkeen tarkasteltavan betoniperheen osalta jatkuvaan laadunvalvontaan, ei betonin esim. vedenpitävyyttä ja pakkasenkestävyyttä täyttäviä ominaisuuksia ole välttämätöntä osoittaa työmaakohtaisesti. Betonireseptit luokitellaan tyypeittäin betoniperheisiin, joiden tuloksia arvioidaan kokonaisvalmistusmäärän ja ajan perusteella. Kun betonin ilmapitoisuudelle on asetettu vaatimus (XF2, XF4) sitä on seurattava rakennuspaikalla tai käyttäytyminen kuljetuksessa rakennuspaikalle on tunnettava luotettavasti. (BY65 2016). Hyväksytyt betonikappaleiden koestuslaitokset on listattu Ympäristöministeriön sivuilla.

Valmisbetonin valmistuksesta otetaan näytteitä tuotantomääriin perustuen ei toimituskohteittain. Kaikkiin betonirakenteisiin ei siksi kohdistu lainkaan laadunvalvontaa. Tämä voi olla ongelmallista, sillä on havaittu, että betonin ominaisuudet nykyisin käytetyillä lisäaineilla voivat muuttua valmistuksen jälkeen. Kolmannen osapuolen valvonta kohdistuu vastaavasti jälkikäteen vain osaan tuotannosta. Tilaajat voivatkin oman etunsa nimissä vaatia tarkempaa laadunvalvontaa edellyttämällä esim. InfraRYL-menettelyä tai Liikenneviraston P-lukumenettelyä, jolloin laadunvalvontaa tehdään myös reseptikohtaisin ennakkokokein, tihennetysti valmistuksessa ja kuljetuksen jälkeen työmaalla. (Mäkikyrö 2017).

## 2.4 Betonin kuljetus

Betonimassa kuljetetaan työmaalle tarkoitukseen sopivalla kuljetuskalustolla. Tavallisesti käytettävien betoniautojen pyörintäsäiliöt ovat kooltaan 4...12 m<sup>3</sup> ja auton valinnassa otetaan huomioon työmaan rajoitukset ja olosuhteet (ahtaat kaupunkialueet, kalliotunnelit ym.) Pyörintäsäiliössä on purkusiivet, joiden avulla betonikuormaa voidaan sekoittaa ja sen koostumusta pitää tasalaatuisena sekä estää erottumista. Normaalitilanteessa kuormaa ei sekoiteta kuljetettaessa ja joissain autoissa kuormaa voidaan pyörittää hitaasti sisään päin, jolla koitetaan välttää betonin karkaaminen säiliöstä. Kuorman jatkuvalla sekoittamisella tai uudelleen notkistamisella voi olla vaikutusta betonin huokoisuuteen ja muihin ominaisuuksiin.

Betonin kuljettamisen aikana betonin ominaisuuksissa tapahtuu muutoksia. Betonista haihtuu vettä ja kovettumisen hydrataatioreaktiot etenevät, mikä heikentää betonin työstettävyyttä. Notkeilla betonilaaduilla kuljetusmatka saattaa aiheuttaa kuorman erottumista siten, että suurempi osuus raskaasta kiviaineesta päätyy kuorman pohjalle ja kevyempi sementtipasta nousee kuorman pintaan.

Kuljettaminen voi vaikuttaa myös betonin ilmamäärään lisäaineiden ominaisuuksista riippuen. Aiemmin alalla on totuttu, että betonirakentamisen ilmamääräongelmat liittyvät ilmamäärän laskemiseen ja suojahuokosten poistumiseen sekoittamisen ja kuljettamisen aikana. Betonin lisäaineena käytettävien tehonotkistimien kehitys on kuitenkin johtanut käyttäytymiseen täysin päinvastaisella tavalla. Nykyiset polykarboksylaatti-eetteri -pohjaiset tehonotkistimien yhteisvaikutus käytössä olevien huokostimien kanssa voi vaatia aiempaa pidemmän sekoitusaikaa lopullisen ilmamäärän saavuttamiseksi. Seuraukset voivat olla vakavia, ellei ilmiötä ole huomioitu oikein valmistuksessa. Joistakin rakenteista on näissä tilanteissa löydetty jopa 15 % kohonneita betonin ilmamääriä. (Al-Neshawy & Punkki 2017)

Eräs huolestuttava esimerkki on ollut Kemijärven ratasillan työmaa, jonka tapauksessa tehtaalla betonimassan ilmamääräksi havaittiin 5 % ja työmaalla 2 tunnin jälkeen ilmamääräksi mitattiin 6 %. Työmaan olosuhdekoekappaleissa ilmamääräksi todettiin kuitenkin 13-15 %. Tässä yksittäistapauksessa tulos vahvistettiin laboratoriossa kapilaarikokeiden ja koekappaleiden tiheyden perusteella. Kuljettamisella ja muilla valmistuksen jälkeisillä vaiheilla oli merkittävä vaikutus, mutta virheitä ei havaittu ilmamäärämittausten avulla. (Matala 2016).

Työmaan logistiikan tai betonointityön ongelmat aiheuttavat ajoittain 0,5 – 1,0 h betonointityön seisahtumisia, mikä lisää betonin ominaisuuksien muutoksia kuljetuksen aikana useiden sekoitusjaksojen vuoksi. Tätä tilannetta simuloivaa erillistä koejärjestelyä ei toteutettu.

## **2.5 Rakenteen betonointi työmaalla**

Betonointityössä betoni siirretään kuljetusautosta purkurännillä, hihnakuljettimella, nostoastialla tai erillisellä pumppuautolla työmaalla valmistettuun ja raudoitettuun valumuottiin. Betoniin kuljetuksessa varastoituneen ylimääräinen ilma poistetaan tiivistämällä, rakenteen pinta tasataan sille asetettujen vaatimusten mukaan ja varmistetaan betonin kosteus- ja lämpötilaolosuhteet jälkihoitotoimenpiteillä. Betonin suuri notkeus lisää betonin herkkyyttä työmaalla tapahtuville muutoksille, tiivistysvirheille ja betonin tasalaatuisuus voi heiketä.

Betonin pumppaamisen tunnetaan yleisesti vaikuttavan betonin ominaisuuksiin ja huokosrakenteeseen. Betonipumpun imupuolella on voimakas alipaine ja putkilinjassa ylipaine, jotka saattavat betonimassan sekoittavaan liikkeeseen. Tulokset ilmamäärän muutoksista pumppauksen aikana eivät kuitenkaan ole yleispäteviä, vaan aiheesta kootut tutkimustulokset vaihtelevat laajasti, muutoksen ollessa suuruudeltaan  $\pm 5$  %. (Vosahlik 2018).

Rakennusteollisuuden selvityksessä (2017) todettiin, että paikoin betonointityön arvostus on laskenut ja sitä pidetään työnä, jossa ei vaadita erityisosaamista. Selvityksessä havaittiin myös, että ”monet suunnittelun ja toteutuksen ammattilaiset kokevat mm. laadun kirjain- ja numerokoodeja olevan liian paljon ja sellaisia, joiden sisältöä ja vaikutusta työhön eivät ulkomuistista tunnista”. Työmaalla betonirakenteiden koskevia määräyksiä ja standardeja ei siis täysin hallita. Betonoinnissa massan erottuminen, tiivistysvirheet ja jälkihoidon puutteet ovat yleisiä ja lujuudenkehityksen seuranta on vajavaista. Työmaan toinen toistaan seuraavien työvaiheiden kireässä aikataulussa luotetaan betonin valmistajan laadunvarmistukseen.

Työmaalla betonin laadunvalvonta on tehtävä rakennusmääräysten B4 kohdan 5.2 mukaisesti. Betonin vaatimustenmukaisuus osoitetaan 28 vuorokauden kuluttua betonoinnista, ellei rakennesuunnittelussa ole muuta määritetty. Työmaan toiminnan aiheuttamaan vaihtelun ja betonin ominaisuuksien heikkenemiselle on eurokoodi-suunnittelussa varauduttu alemmalla osavarmuuskertoimella. Nimellislajuudesta 85 % täyttävä rakenne on vaatimusten mukainen (RakMK B4 6.3.4, tarkemmin tämän työn luvussa 6.3).

Kun rakennetta valmistetaan P-lukubetonilla, edellytetään työmaalta ilmamäärän mittausta 5 ensimmäisestä betonikuormasta sekä tämän jälkeen joka kymmenestä betonikuormasta. P-lukubetonin puristuslujuus voidaan osoittaa kimmovasarella tai koekappaleilla, joita on vähintään 6 tai vähintään 1 koekappale alkavaa 100 betoni- $m^3$  kohti. Vähintään puolet koekappaleista tulee valmistaa rakennuspaikalla. Liikennevirasto määräsi rakenteilleen lisäksi tehostetut betonin laadunvarmistustoimenpiteet marraskuussa 2016. Tällöin työmaalla on valmistettava Liikenneviraston rakenteista vähintään 6 koekappaletta sekä vähintään 1 koekappale alkavaa 100 betoni- $m^3$  kohden. (Liikennevirasto 2016).

### 3 Betonin ominaisuudet

#### 3.1 Betonin perusyhtälö

Betonitekniiikan tarkasteluissa yksinkertaistavana lähtökohtana on betonin perusyhtälö (kaava 1), jonka mukaisesti osa-aineiden ja ilmamäärän tilavuuksien summa on yhtä suuri kuin valetun betonin tilavuus.

$$V_b = \frac{Q_s}{\rho_s} + \frac{Q_k}{\rho_k} + \frac{Q_v}{\rho_v} + Q_i = 1000 \text{ dm}^3 \quad (1)$$

missä

$V_b$	betonikuution tilavuus, 1000 dm <sup>3</sup>
$Q_s$	sementin määrä [kg]
$Q_k$	kiviaineksen määrä [kg]
$Q_v$	vesimäärä [kg]
$\rho_s$	sementin tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	kiviaineksen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_v$	veden tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]

#### 3.2 Otoskeskihajonta

Kokeellisten tutkimusten toistoista saatujen tuloksien kuten tässä tutkimuksessa mitattujen betonin ominaisuuksien vaihtelun kuvaamiseen voidaan käyttää otoskeskihajontaa (kaava 2)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n-1}} \quad (2)$$

missä

$f_{ci}$	yksittäinen koetulos
$f_{cm}$	n kappaleen koetuloksen keskiarvo
$n$	koetulosten lukumäärä

#### 3.3 Betonin tiheys

Betonin tiheys kertoo betonin massan suhteessa sen tilavuuteen. Tuoreen betonin tiheys mitataan punnitsemalla. Kovettuneen betonin tiheyteen vaikuttaa oleellisesti kappaleen kosteustila. Kovettuneen betonin määritetään ensisijaisesti punnitsemalla sekä vedessä että ilmassa ja toissijaisesti mitattujen mittojen perusteella, jolloin kappaleen kosteustila raportoidaan osana tuloksia. Suurena betonin tiheys antaa erityisesti tietoa betonin huokoisuudesta, kun betoni muuten on vertailukelpoista.

Tuoreen betonin tiheyden määrittäminen tehdään standardin SFS-EN 12390-6 mukaisesti. Betonimassa tiivistetään rakenteeltaan jäykkään, vesitiiviiseen astiaan, jonka oma massa ja tarkka tilavuus tunnetaan. Astian on oltava tilavuudeltaan vähintään viisi litraa ja sisämitaltaan 150 mm sekä ylittää nelinkertaisesti betonin suurimman runkoaineen raekoko.

Työmaaolosuhteissa tuoreen betonin tiheyden määrittämiseen käytetään tavallisesti ilma-  
määrämittauksen paineastiaa, jonka tilavuus on  $8 \text{ dm}^3$  (litraa). Betonin punnitsemiseen voi-  
daan käyttää työmaalaborantin varustukseen kuuluvaa vaakaa, jonka kalibroitu tarkkuus tu-  
lee olla vähintään 0,01 kg. Tärytykseen voidaan käyttää sauvatärytintä, tärypöytää tai sul-  
lontasauvaa siten, että saavutetaan massan täydellinen tiivistyminen. Täyttö ja tiivistys tulee  
tehdä vähintään kahdessa osassa. Tiheysastian pinta tasoitetaan tiivistyksen jälkeen ja astia  
puhdistetaan ulkoreunoilta. (SFS-EN 12390-6 2009).

Tuoreen betonin tiheys voidaan laskea käyttäen kaavaa 3.

$$\rho_{\text{tuore betoni}} = \frac{m_2 - m_1}{D} \quad (3)$$

missä

$\rho_{\text{tuor.betoni}}$	tuoreen betonimassan tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]
$m_1$	tyhjän astian massa [kg]
$m_2$	tiivistetyllä betonilla täytetyn astian massa [kg]
$D$	astian tilavuus [ $\text{m}^3$ ]

Tuoreen betonimassan tiheys ilmoitetaan standardin mukaan pyöristettynä lähimpään 10  
 $\text{kg/m}^3$  (SFS-EN 12390-6 2009). Betonitekniikan tutkimuksessa on järkevää käyttää mah-  
dollisimman suurta tarkkuutta, esim. 1  $\text{kg/m}^3$ .

Kovettuneen betonin tiheyden määrittäminen tehdään standardin SFS-EN 12390-7 mukaisesti.  
Määrittämiseen on kaksi menetelmää ja yhteensä kolme vaihtoehtoa: 1) punnitus vedessä ja  
ilmassa vedenkyllästämässä tilassa hyödyntäen kaavaa 5. 2) mittaamalla koekappaleen tila-  
vuus tarkkaan 3) hyödyntämällä kalibroidun kuutiomuotin nimettyjä mittoja kaavassa 6.

Vedellä kyllästetyn kappaleen punnitseminen veden alla perustuu yleisesti tunnettuun Ark-  
himedeen lakiin, jonka perusteella kiinteän aineen tiheys voidaan määrittää punnitsemalla  
kappaleen massa ilmassa ja nesteessä, kun nesteen tiheys tunnetaan.

Arkhimedeen laki (kaava 4).

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} * \rho_n \quad (4)$$

missä

$m_1$	kappaleen massa ilmassa
$m_2$	kappaleen massa nesteessä
$\rho$	tutkittavan kappaleen tiheys
$\rho_n$	nesteen tiheys



Kovettuneen betonin tilavuus vesipunnituksessa määritettynä (kaava 5).

$$\rho_{\text{kovettunut betoni A}} = \frac{m_{\text{ilmassa}}}{m_{\text{ilmassa}} - m_{\text{vedessä}}} * \rho_{\text{vesi}} \quad (5)$$

missä

$m$	kappaleen massa testaushetken kosteustilassa [kg]
$m_{\text{ilmassa}}$	vedellä kyllästetyn koekappaleen näennäinen massa ilmassa [kg]
$m_{\text{vedessä}}$	vedellä kyllästetyn koekappaleen näennäinen massa veteen upotettuna [kg]
$\rho_{\text{vesi}}$	veden tiheys 20 °C, oletusarvona 998 kg/m <sup>3</sup> (ripustuskorin massa on sisällytettävä molempiin)

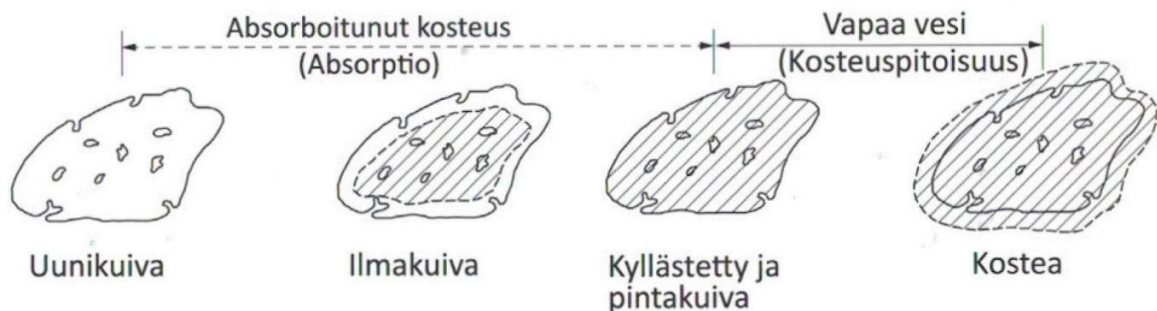
Kovettuneen betonin tilavuus mitattujen mittojen mukaan suhteessa kosteustilaan:

$$\rho_{\text{kovettunut betoni B}} = \frac{m}{V} \quad (6)$$

missä

$m$	kappaleen massa testaushetken kosteustilassa [kg]
$V$	kappaleen mitattu tai nimetty tilavuus [m <sup>3</sup> ]

Betonin tilavuudesta noin 65-75 % on kiviainesta ja käytännössä myös betonissa käytettävä kiviaines on huokoista. Useimpien käytettävien kivilajien huokoisuus vaihtelee välillä 0-5 % ja tällöin kiviaineksen huokoisuudella on merkittävä vaikutus koko betonin huokoisuuteen. Kiviaineksen huokokset voidaan havaita jopa paljaalla silmällä tai mikroskoopilla, mutta useimmat kiviainekset huokosista ovat hyvin pieniä vastaavasti kuten sementtipastassa. Huokokset voivat sijaita missä tahansa kappaleessa: olla kiinteän kiviaineksen sisällä tai esimerkiksi suoraan auki pintaan. (Gambhir 2013, Neville 1995).



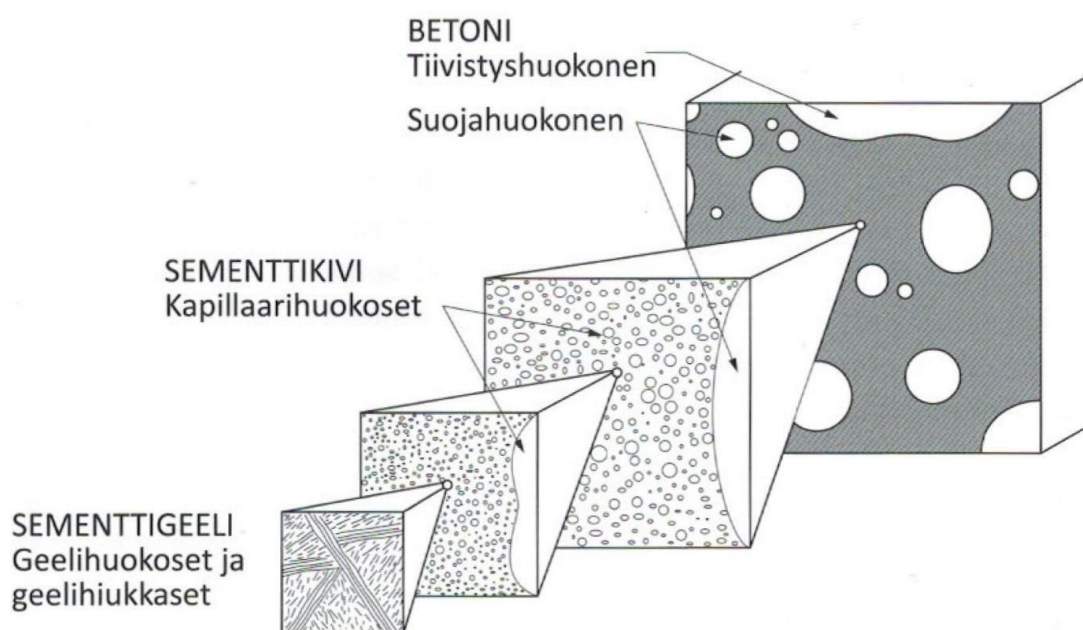
**Kuva 6 Kiviaineksen kosteusolomuodot (By 201 2018, s.50)**

Runkoaineen eri kosteustilat on esitetty kuvassa 5. Kun kaikki kiviaineksen huokokset ovat täynnä vettä kappale on kyllästetty ja pintakuiva. Mikäli kappaleen pinnassa on lisäksi ylimääräistä vapaata vettä, kappale on kostea. Kun kiviainesta säilytetään kuivissa sisäilmaolosuhteissa esimerkiksi laboratoriossa, osa sen pinnassa olevista huokosista pääsee kuivamaan ja sitä kutsutaan ilmakuivaksi. Kaikki kosteus kivistä saadaan poistettua kuivaamalla kappaletta uunissa kunnes näytteen massa ei enää muutu ja näin määrittää kiviaineksen kuivapaino. (BY 2018).

Kiviaineksen kosteutta kuvaavia tiloja voidaan hyödyntää vastaavasti myös betoninäytteen kosteustilan kuvaamisessa. Oikeiden johtopäätösten tekemiseksi kappaleessa sisällä oleva kosteus ja vesimäärä täytyy tuntea sekä kiviaineksessa betonin valmistuksessa että betonissa sitä betonitekniikkaa koskevissa tutkimuksissa.

### 3.4 Betonin huokoisuus ja ilmamäärä

Betoniin ja erityisesti sementtipastan mikrorakenteeseen muodostuu valmistuksessa huokoisuutta, mikä vaikuttaa merkittävästi betonin ominaisuuksiin. Valmistuksen aikana betonin ilmamäärä nousee tavallisesti 1-2 % eli 10...20 dm<sup>3</sup> kuutiometrissä. Huokokset voidaan jakotella kokonsa ja syntymekanisminsa puolesta geeli-, kapillaari-, supistumis- ja tiivistyshuokosiin. (BY 2018). Betonin pakkasenkestävyyden parantamiseksi betoniin voidaan muodostaa lisäksi jäätymiseltä suojaavia suojahuokosia huokostavan lisäaineen avulla.



Kuva 7 Betonin huokosrakenteen kaaviokuva (BY 201 2018 s. 82)

Geelihuokokset muodostuvat hydrataatiossa sementtipastaan trikalsiumsilikaatin (C<sub>3</sub>S) päätuotteen CSH-geelin kiteiden väliin vesitäytteisiin tiloihin, joita CSH-kiteet eivät onnistu täyttämään. Kiteitä tuottavat kalsiumsilikaattiyhdisteet (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S) muodostavat 50-60 % kovettuneesta sementtipastasta. Vapaiden geelihuokosten käyttäytymistä ei tunneta tarkasti, sillä ne ovat kokoluokaltaan hyvin pieniä, 1-10 nm. On arvioitu, että huokokset ovat niin pieniä, etteivät ne oleellisesti vaikuta betonin vedenläpäisevyyteen, absorboituneen veden liikkeisiin tai betonin lujuuteen. (Mehta & Monteiro 2014).

Kapillaarihuukosiksi nimitetään betonin sisällä olevia geelihuukosia suurempia tyhjiä tiloja. Kokonsa puolesta kapillaarihuukosten tunnetaan mahdollistavan veden ja yhdisteiden kuten kloridien kulkeutumiseen betonissa. Kapillaarihuukosissa sijaitseva vesi jäätyy ja aiheuttaa jännitystä betonin sisällä. Kapillaarihuukosten määrä on pääosin riippuvainen betonin vesi-sementtisuhteesta ja hydrataation vaiheesta eli hydrataatioasteesta. Kapillaarihuukosissa kyse on tiloista, joita hydratoitunut sementtipasta ei ole täyttänyt. Kapillaarihuukosiksi laskettavien huukosten koko vaihtelee laajasti vesi-sementtisuhteesta riippuen, 10 nm ja 50 µm välillä. (Mehta & Monteiro 2014).

Sementin ja veden reagoidessa aineiden kokonaistilavuus pienenee. Vettä sitoutuu kemiallisesti ja pieni osa vedestä haihtuu pinnoilta. Sementin hydrataatio tuotteet laajenevat samassa noin kaksinkertaisiksi alkuperäisestä sementin tilavuudesta. Sekoitukseen lisätty veden määrä ratkaisee tällöin syntyvien kapilaarihuokosten määrän. Eräässä tutkimuksessa betonia valmistettiin 0,42 vesisementtisuhteella, annoksessa oli suhteessa sementtiä 31,8 ml (100g) ja 42 ml vettä. Kun hydrataatioaste oli 100 % hydratoituneen sementin ja geelihuokosissa olevan veden tilavuus oli 67,9 ml. Tämän lisäksi betoniin jäi tyhjiä kapilaarihuokosia 5,9 ml. Mikäli veden määrää ja vesi-sementtisuhdetta kasvatettiin, kapilaarihuokosten määrä oli seurauksena suurempi. (Neville 1995). Kapilaarihuokosten määrä ja siten vesi-sementtisuhteet ovat keskeisiä betonin pakkasenkestävyyden kannalta. Kapilaarihuokosten suuri määrä lisää rakenteeseen pääsevän kosteuden määrää.

Tiivistyshuokosiksi kutsutaan tyhjiä 80 µm suurempia tiloja, joita jää betoniin sekoituksen, kuljetuksen ja valutyön aikana. Tiivistyshuokokset pyritään poistamaan valutyön ja näytteenoton yhteydessä tiivistämällä betonia täryttämällä. Puutteellinen tiivistys ja betoniin jäävät tiivistyshuokokset heikentävät betonin lujuutta ja tiiveyttä. (Mehta & Monteiro 2014).

Huokostavalla lisäaineella betoniin muodostetaan 10...800 µm suojahuokosia. Suojahuokokset tarjoavat betonin sisällä olevalle kosteudelle tilaa laajeta jäätymisen aikana, mikä parantaa betonin pakkasenkestävyyttä. Keskeistä on myös suojahuokosten välinen etäisyys, jonka tulisi olla alle 400 µm. Tämä menettely suojaa jäätymisen aiheuttamalta jännitykseltä ja sen aiheuttamalta betonin halkeilulta ja rapautumiselta. Suojahuokokset syntyvät betoniin sekoituksen aikana, kun huokostava lisäaine kaappaa ja sitoo ilmaa sementtipastan sisään. (By 2018).

Betonin huokostuksessa betoniin pyritään korottamaan ilmamäärää + 3-5 %, joten huokostetun betonin ilmamäärä on yhteensä 5-7 %. Ilman määrä ei kuitenkaan varmasti kerro huokosten koosta ja huokostuksen onnistumisesta, joten pakkasenkestävyys on arvioitava muiden kokeiden perusteella. Huokostus parantaa myös tuoreen betonin työstettävyyttä ja nopeuttaa kuivumista. Huokostavaa lisäainetta voidaan käyttää myös lattiabetonin kuivumisen nopeuttamiseksi.

Betonin ilmamäärän ja huokoisuuden lisääminen 1 % on todettu tavanomaisten ilmamäärien kohdalla heikentävän lujuutta varsin suoraviivaisesti noin 5 % (Gambhir 2013, Neville 1995). Puristuslujuutta on laajemmin käsitelty luvussa 3.7.

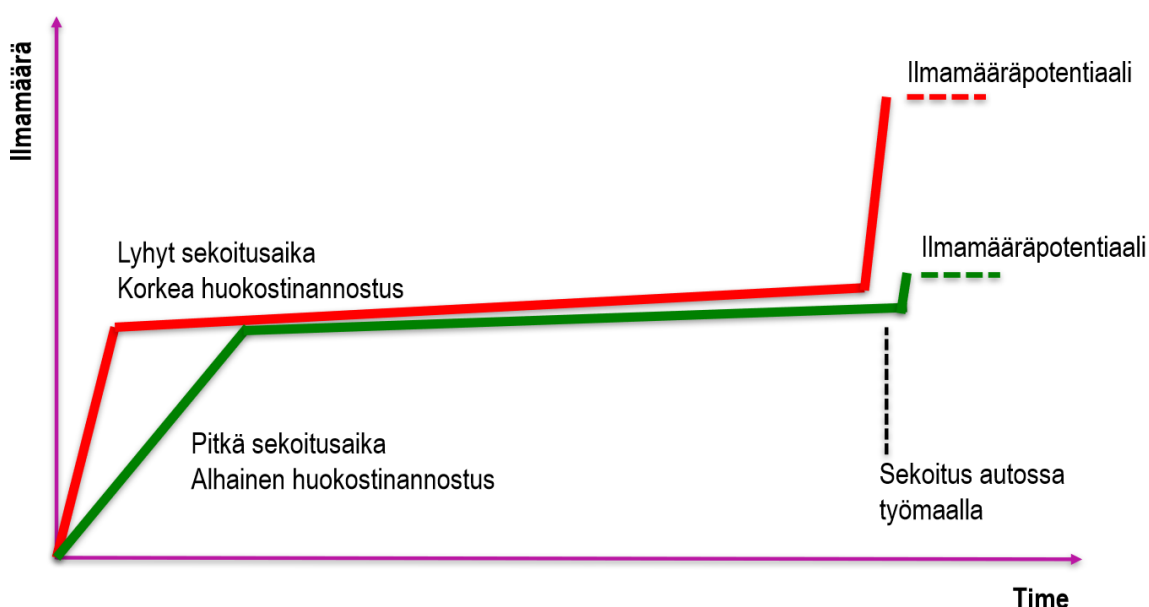
Betonin ilmamäärän määrittäminen tehdään tuoreesta betonista painemittarimenetelmällä tai vesipatsasmenetelmällä. Tavallisessa painemittauksessa painesäiliö täytetään tuoreella betonimassalla kanteen saakka yhdessä tai useammassa kerroksessa tiivistäen siten, että betoni on täydellisesti tiivistynyt. Tiivistämisessä vältetään liiallista tärytystä, joka voi poistaa näytteestä myös huokosilman ja vääristää tulosta. Ylimääräisen massan poistamista tulee välttää, jotta arvostettava betoninäyte säilyy koostumukseltaan mahdollisimman edustavana. (SFS-EN 125350-7 2009). Standardi jättää paljon vaihtoehtoja hyväksyttävään tiivistykseen ja tämä voi vaikuttaa eri henkilöiden ilmamäärämittauksista saamiin tuloksiin.

Ilmamäärämittauksessa on huomioitava lisäksi kiviaineksen korjaustekijä, joka vähennetään saadusta mittaustuloksesta. Korjaustekijä määritetään testaamalla ja on tavallisesti 0,1-0,2 %. Betoninäytteen ilmamäärä ilmoitetaan 0,1 % tarkkuudella (SFS-EN 125350-7 2009).

Ilmamäärämittaus voi myös epäonnistua tai voidaan tehdä väärin. Tämän osoittavat Kemi-järven vuoden 2016 tapahtumat, joissa tehtaalla betonimassan ilmamäärä oli mitattu 5 % ja työmaalla 2 tuntia myöhemmin 6 %. Työmaan olosuhdekoekappaleiden ilmamääräksi määritettiin kuitenkin 13-15 %. Tulos vahvistettiin laboratoriossa kapilaarikokeiden ja koekappaleiden tiheyden perusteella. (Matala 2016).

Betonin pakkasenkestävyys voidaan osoittaa suojahuokossuhteen määrittelyllä ja jäädytys-sulatuskokeella. Huokosjakovaatimuksen täyttäminen saattaa johtaa betonin suhteutuksessa ilmamäärän säätämiseen sallitun vaihteluvälin ylärajoille. Ilmamäärän kohoaminen valmistusketjussa aiheuttaa siksi helposti ilmamäärän kohoamisen kokonaisuutena liian suureksi (Rakennusteollisuus 2017).

### 3.5 Ilmamääräpotentiaali



Kuva 8 Kuvaus betonin ilmamääräpotentiaalista (Al-Neshawy & Punkki 2017)

Ilmamääräpotentiaalin käsitteellä voidaan havainnollistaa betonin ilmamäärän kehittymistä betonin sekoitusajan funktiona (kuva 4). Ilmamääräpotentiaalin arvioidaan olevan huokostin/nostkistin -lisäaineyhdistelmästä, lisäaineiden annostuksesta ja betonin suhteuksista riippuva ominaisuus kuten Aalto-yliopiston Robust Air -tutkimuksessa on esitetty. Lisäaineiden kehittyminen on muuttanut betonin käyttäytymistä siten, ettei kaikki potentiaalinen ilmamäärä vapaudu betoniin tavanomaisessa 60-120 sekunnin sekoitusajassa.

Betonin ilmamäärän nousu on monimutkainen ilmiö, johon on useita vaikuttavia tekijöitä. Ilmamäärän muodostumiseen keskittyneen Robust Air-tutkimuksen perusteella keskeistä on hallita notkistimen laatua, määrää ja toimintaa kuljetuksen aikana ja edelleen massan sekoituksessa työmaalla. Tutkimuksen tarkasteluissa betonin korkea tehonotkistinannostus vaikutti lisäävän riskiä ilmamäärän nousulle lyhyen varsinaisen sekoitusajan jälkeen. (Al-Neshawy & Punkki 2017).

### 3.6 P-Lukumenettely

Liikenneviraston siltabetonien pakkasenkestävyyysluku eli P-luku on työkalu betonisten taitorakenteiden rakennuttamiseen. P-luku määritetään rakennesuunnitelmiin ja se pyrkii kuvaamaan betonireseptin teknisiä ominaisuuksia vaativassa silta- ja tieympäristössä. Vaatimustaso voi olla P20, P30, P50 tai P70, jolloin rakenteen pakkasenkestävyys on parempi luvun kasvaessa. P-luku lasketaan kaavalla, joka perustuu Liikenneviraston vuosikymmenen aikana keräämään tutkimustietoon ja on riippuvainen työmaalla mitatusta betonin ilmamäärästä. P-lukumenettely sisältää muutamia yksityiskohtaisia vaatimuksia betonisten taitorakenteiden suhteuttamiseen, valmistamiseen ja laadunvalvontaan, jotka ovat yleisiä betoninormeja tarkemmat ja pääosin vaativammat. (Liikennevirasto 2016).

**Taulukko 2 P-lukubetonin ilmamäärävaatimukset, kun  $D \geq 16$  mm (Liikennevirasto 2016)**

Vesi-sideainesuhde	Ilmamäärän vähimmäisarvo ja ohjeellinen ilmamäärän enimmäisarvo eri pakkasenkestävyysluokissa			
	P20	P30	P50	P70
0,60	5–7 %	5–7 %	-	-
0,50	3–5 %	4–6 %	6–8 %	-
0,40	2–4 %	3–5 %	4–7 %	(7–9 %) <sup>1)</sup>
0,32	2–4 %	2–4 %	2–5 %	3–5 %
<0,32	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.

<sup>1)</sup> Vain interpolointia varten

P-lukumenettelyohje esittää rajat, joiden puitteissa betonin osa-aineet voidaan valita. Keskeiset parametrit ovat betonin ilmamäärä ja vesi-sementtisuhde. Taulukossa 2 on esitetty esimerkiksi betonin ilmamäärää koskevat vaatimukset. Sideaineen vähimmäismäärä on 300 kg/m<sup>3</sup>. Sementtiä korvaavat seosaineet lentotuhka, masuunikuona ja silika ovat sallittuja ja huomioidaan omilla seosainekertoimillaan. P-lukubetonin valmistaminen velvoittaa aina teettämään betonireseptistä ennakkokokeet, joilla varmistetaan betonin ominaisuuksien täyttyminen ja mm. käytettävien lisäaineiden yhteensopivuus. Ennakkokokeet sisältävät myös huokostuksen laadun erillisen tarkistamisen esim. optisella huokosjakokokeella tai suoralla pakkaskokeella. Ennakkokoe tulokset ovat voimassa yhden vuoden ajan, minkä jälkeen ne tulee uusiksi. Tällä voidaan varmistaa, ettei valmistus-, annostelulaitteiden ja henkilökunnan kyykytyksen säilyneen vaikutus betonin osa-aineet olisi vaihtuneet. (Liikennevirasto 2016).

Työmaalaadunvalvonnassa noudatetaan Betoninormeja BY65, minkä lisäksi P-lukubetonin ilmamäärä on tarkistettava viidestä ensimmäisestä betonikuormasta ja tämän jälkeen joka kymmenestä betonikuormasta. Työmaalla mitattua ilmamäärää käytetään P-lukulaskemissa. Mitattujen ilmamäärien keskiarvon tulee ylittää taulukon 2 vähimmäisvaatimus ja toisaalta yksittäinenkin ilmamäärätulos ei saa ylittää suhteutusta enempää kuin 3 %-yksikköä. (Liikennevirasto 2016).

Mikäli työmaakokekappaleissa tai valmistuksen aikana ei havaita mitään poikkeavaa, valmiin rakenteen pakkasenkestävyyttä tai muita ominaisuuksia ei tarvitse todentaa (Liikennevirasto 2016). Mikäli P-lukurakenteessa päädytään täydentävään laadunvalvontaan porakappaleilla, näytteenottoon on omat vaatimuksensa ja P-luku määritetään 56-kierroksen pakkassuolako-keella CEN/TS 12390-9 mukaisesti. (Infra RYL 42020.1.2.4 2006).

P-lukumenettely edellyttää P-lukulaskelman, reseptin ennakkokoetulosten ja valmistuslaitoksen sekä rakennuspaikan laadunvalvonnan dokumentoinnin luovuttamisen tilaajalle. Lisäksi asiakirjat on säilytettävä 10 vuoden ajan. (Liikennevirasto 2016)

P-lukumenettelyllä on pyritty korottamaan laatutasoa vaativissa betonirakenteissa. Korkealle asetettu suhteutuksen vaatimustaso ja keskittyminen ilmamäärän valvontaan ovat tehokkaita toimenpiteitä. Käytännön rakentamisessa osa määräyksistä saattaa kuitenkin jäädä toteutumatta, kun esimerkiksi aikataulusyistä ennakkokokeita ei ehditä toteuttaa betonitilauksen ja toimituksen välissä. Tällöin betonin tilaaja saattaa sopia P-lukumenettelystä poikkeamisesta ja vastuu määräysten oikaisemista saattaa jäädä epäselväksi (betonitoimittaja/betonitirakoitsija/pääurakoitsija). P-lukubetonia pidetään alalla vaativana valmistaa ja useimmiten P-lukumenettely ohjaa laadullisesti hyviin tuloksiin lisääntyvän ennakkosuunnittelun ja laadunvalvonnan kautta. (Mäkikyrö 2017). Menettely asettaa valmistajalle yleisohjausta ja vaatimuksia betonin maksimivesimäärän ja hienoainesmäärän suhteen (Liikennevirasto 2016). Näiden ei voi suoraan pitää pakkasen kestävyysvaatimuksina, mutta ohjaavan soveltuvan betonin valmistamiseen.

### **3.7 Betonin puristuslujuus**

Puristuslujuus kertoo kappaleen kapasiteetista kestää puristavaa voimaa ja siitä käytettävä yksikkö on megapascali (MPa). Suurena puristuslujuus antaa hyvän yleiskuvan betonin laatuoluokasta. Betonilla on korkea puristuslujuus ja betonirakenteet suunnitellaan toimimaan puristettuina. Tyypillisesti betonin puristuslujuus on 30-60 MPa, mihin verrattuna vetolujuus on pieni, vain 5-10 % luokkaa puristuslujuudesta. (Mehta & Monteiro 2014). Tämä ohjaa käyttämään rakenteiden suunnittelussa teräsbetonia-komposiittirakennetta, jossa esim. palkin vetolujuudesta vastaavat terästagot ja puristuslujuudesta betoni.

Betonin lujuuden arvosteluikä on tavanomaisesti 28 vuorokautta tai tietoisesti hitaampaa lujuudenkehitystä tavoiteltaessa 91 vuorokautta. Betonin puristuslujuuden vertailusuurena käytetään normikoelieriön 150mm x 300mm puristuslujuutta (ns. C-lujuus) tai normikoekuution 150 mm x 150 mm puristuslujuutta, (ns. K-lujuus). Europan alueella käytössä on yhtenäinen Eurokoodi - menettely valmistaa betonia lujuusluokittain, joissa ilmoitetaan C-/K -lujuus. Tämän tutkimuksessa betonin puristuslujuusluokka on esimerkiksi C35/45. (BY 2018).

Betonin puristuslujuus määritetään kovettuneesta betonikoenäytteestä, joka voi olla muodoltaan kuutio tai lieriö. Puristuslujuuden luotettavassa määrittämisessä keskeistä on vakioida kaikki prosessin eri vaiheet mm. koekappaleen muotit, näytteenotto, säilytysolosuhteet ja puristuslaite. Nämä asiat on määritelty EN-standardeissa 12350-1 & 12390-2. Koekappaleen valmistuksessa kalibroitu muotti täytetään ja tiivistetään hyvin kuitenkin siten, ettei betoni ilmamäärä laske. Näytteet säilytetään kuivumiselta suojattuja 16-72 h ja siirretään puristusajankohtaan saakka vesiupotukseen tai 95 % kosteudella varustettuun tilaan. Normikoekappaleet puristetaan vedellä kyllästyneinä, pintakuivattuna.

Koekappaleen kuormituspinnat tulee hioa tai käsitellä suoraksi käyttäen a) rikillä tai b) kalسيوم-aluminaattisementtilaastilla. Kappaletta kuormitetaan puristustestauskoneella sen murtumiseen saakka ja lujuus määritetään suurimman voiman ja kappaleen dimensioiden perusteella. (SFS-EN 12390-3 2009).

Puristuslujuus määritetään puristuskokeen tuloksen pohjalta kaavalla 7.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (7)$$

missä

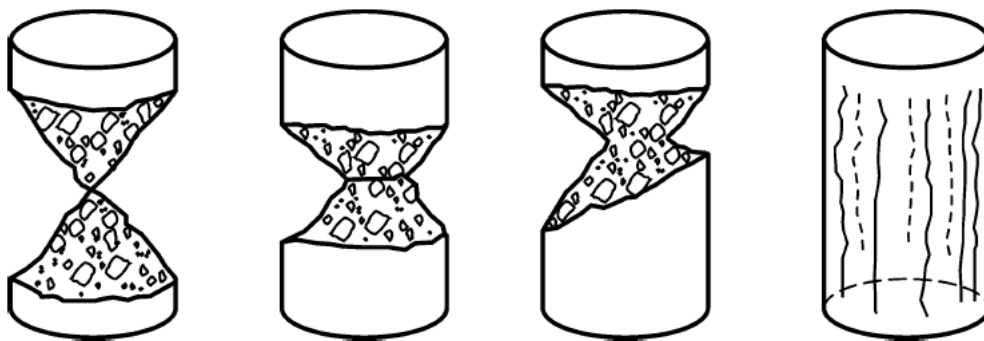
$f_c$  on puristuslujuus MPa [N/mm<sup>2</sup>]

$F$  on suurin kuorma murtohetkellä [N]

$A_c$  on koekappaleen poikkileikkauksen pinta-ala [mm<sup>2</sup>]

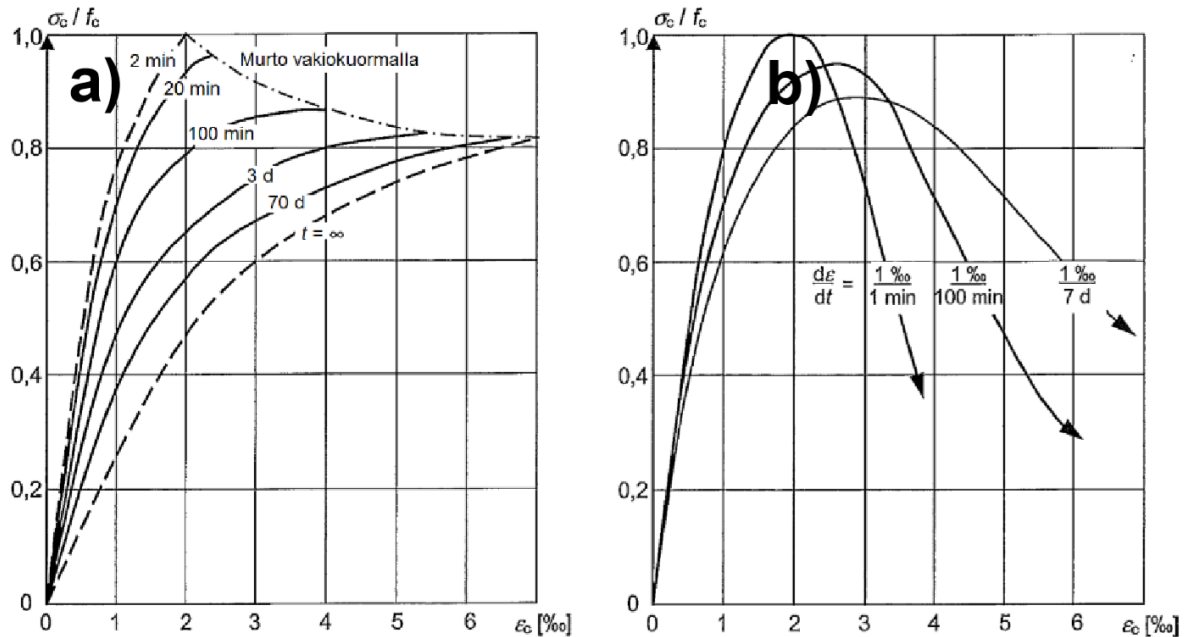
Puristuslujuustulos tulee ilmoittaa pyöristettynä lähimpään 0,1 MPa [N/mm<sup>2</sup>] (SFS-EN 12390-3 2009).

Betonilaadulle ominainen puristuslujuus muodostuu raaka-aineiden, kovettumisolosuhteiden, tiivistysasteen ja vesi-sementtisuhteen perusteella. Matala vesi-sementtisuhte ja korkea puristuslujuus ovat yhteydessä keskenään, sillä betoniannoksen kasvava vesimäärä lisää valmiin rakenteen huokoisuutta. (Haavisto & Laaksonen 2018). Betonin ilmamäärän nousu yhdellä prosenttiyksiköllä tyypillisesti heikentää vastaavasti puristuslujuutta 5-8 % (SFS-EN 12379-1)



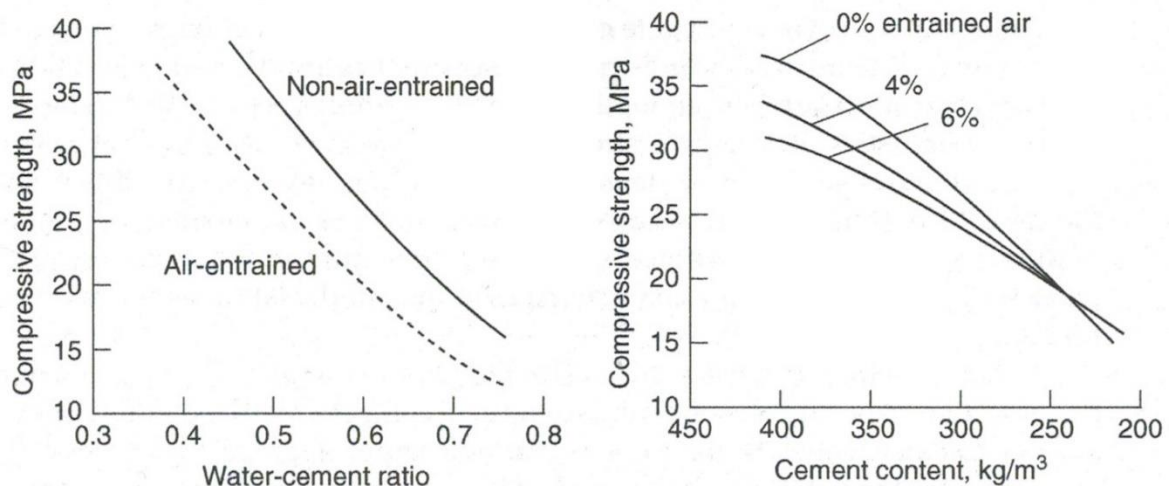
Kuva 9 Hyväksyttäviä murtotapoja lieriömäisille koekappaleille (SFS-EN 12390-3 2009).

Betonin puristuslujuuskokeessa puristettava kappale jää tiukasti yksiakselisen puristuksen kohteeksi, jolloin kappale pyrkii laajenemaan keskeltä sivuille. Tällöin sementtikivi tai sementtikivi- ja kiviaines molemmat halkeilevat pääjännitysten suunnassa. Kappale murtuu, kun halkeamat yhdistyvät ja puristava voima ylittää rakenteen kapasiteetin. (Haavisto & Laaksonen 2018). Kuvassa 9 esitetty ehjän koekappaleen murtumistapoja.



Kuva 10 Eurokoodin esittämä kuormitusajan ja -kuormitus nopeuden vaikutus betonin lujuuteen (Haavisto & Laaksonen 2018)

Todellisissa pitkäkestoisissa kuormitustilanteissa betonirakenteet kestävät lyhytkestoista puristuslujuuskoetta vähemmän kuormaa (kuva 10). Pysyvässä kuormitustilanteissa betonin kapasiteetti voi laskea lähes 20 % standardin mukaista puristuskoetta alhaisemmaksi. Suomessa rakenteiden mitoituksessa tämä vaikutus on otettu huomioon useiden muiden lujuutta heikentävien tekijöiden ohella (nimelliskapasiteetista 85 % käytetään). Kuormitusajan ja -nopeuden vaikutusta on tutkimusten perusteella esitetty suunnittelua ohjaavassa Eurokoodissa EN-1992-1-1.



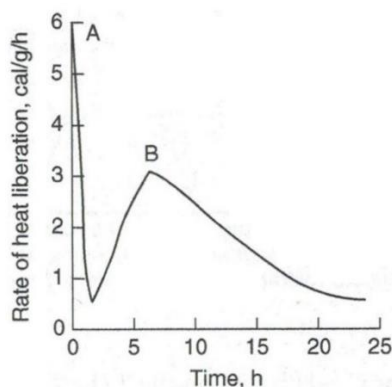
Kuva 11 Vesi-sementtisuhteen ja huokostuksen vaikutus betonin lujuuteen (Mehta & Monteiro 2014)

Betonin vesi-sementtisuhteen tiedetään vaikuttavan hyvin suoraviivaisesti betonin lujuuteen muiden tekijöiden pysyessä muuttumattomina. Vesi-sementtisuhteen pienentäminen vähentää kapilaarihuokosia sementtipastassa ja parantaa samalla sementtipastan sekä kiviaineksen välistä liitosta. Betonin suojahuokostuksella on samoista syistä vastaava, mutta käänteinen lujuutta laskeva vaikutus. Ilmiön suuruusluokka on esitetty kuvassa 11. Muita loppulujuuden



kannalta keskeisiä tekijöitä ovat sementtityyppi ja kiviaineksen ominaisuudet. Kiviaineksen lujuus ei tavallisesti ole merkitsevä, mutta kiviainesten koko, rakeisuus ja pinta vaikuttavat sementtikiven ja kiven rajapinnan lujuuteen. (Mehta & Monteiro 2014)

Betonissa vapautuu lämpöenergiaa lujuudenkehityksen edetessä, koska sideaineen eli pääasiassa sementin klinkkerimineraalien hydrataatioreaktiot veden kanssa ovat eksotermisiä eli lämpöä vapauttavia. Ensimmäisenä betonissa reagoivat aluminaattiyhdisteet ( $C_3A$ ,  $C_4AF$ ), jotka luovat sekoittamisen jälkeisen lämpöpiikin. Sementteihin lisätään kipsiä, jotta betonin reaktiot hidastuvat kuljettamisen ajaksi 2-3 h ajan (kuva 12).



Kuva 12 Lämmönkehityksessä on kaksi huippua 0-1 h ja 4-8h sekoituksesta (Mehta & Monteiro 2014)

Tavanomaisilla portlandsementeillä valmistetussa betonissa puolet reaktiolämmöstä vapautuu 1-3 vrk kuluessa, kolme neljäsosaa lämmöstä 7 vrk kuluessa ja 83-91 % puolen vuoden aikana. Lujuuden- ja lämmönkehitys ovat riippuvaisia sementin koostumuksesta, hienoudesta, vallitsevasta lämpötilasta ja lisäaineista. Lujuuden- ja lämmönkehitysreaktiot jatkuvat betonissa hidastuen jopa kymmeniä vuosia. (Neville 1995).

Betonin mikrorakenteen hallitun kehittymisen kannalta kovettumisen tulisi tapahtua alle 60 °C lämpötilassa ja siten, ettei lämpötila ero rakenteesta ylitä 20 °C metrillä. Vastaavasti myös matalia lämpötiloja on vältettävä, sillä ne hidastavat hydrataatioreaktioita. Esimerkiksi eräässä laajassa tutkimuksessa +1 °C lämpötilassa 28 vrk ajan valun jälkeen säilytetty koe-kappale saavutti 50 % 21°C säilytetyn vertailukappaleen lujuudesta ja -9 °C pakkasessa säilytetty vastaava kappale n. 5-10 % vertailukappaleen lujuudesta (Mehta & Monteiro 2014).

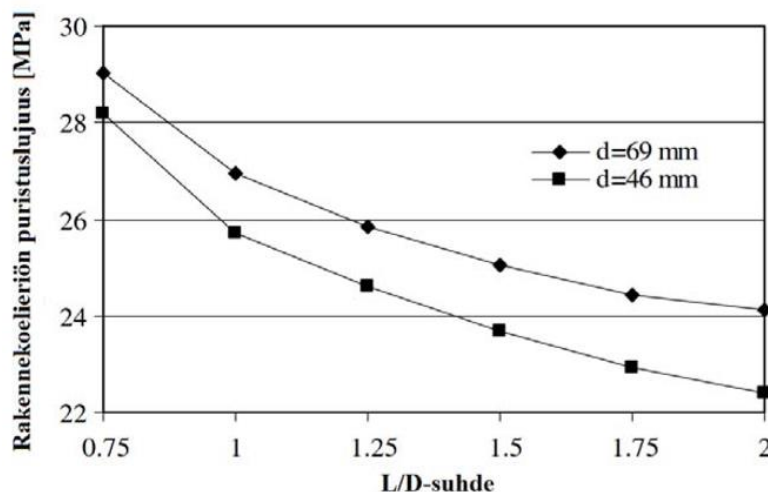
### 3.8 Puristuslujuuden määrittäminen valmiista rakenteesta

Ainoa tapa arvostella valmiin betonirakenteen ominaisuuksia on irrottaa rakenteesta betoni-näytteen timanttiporaamalla. Suomessa voimassa olevien Betoninormien (BY 65 2016) mukaan koekappale suositellaan toteutettavaksi lieriönä, jonka halkaisija on vähintään 100 mm tai kolme kertaa suurempi kuin betonissa käytetty suurin runkokiviaines. Tarvittaessa voidaan käyttää myös eri kokoisia kappaleita, mutta tuloksia on arvioitava perustellusti.

Valmiin betonirakenteen puristuslujuudessa on aina enemmän hajontaa kuin valunaikaisien koekappaleiden tuloksissa. Rakenteesta porattuun tulokseen vaikuttavat työnaikaiset tekijät, betonin mahdollinen erottuminen, tiivistyksen puutteet ja jälkihoidon laatu. Lisäksi betoni on saattanut altistua rakenteen kuormitukselle tai kutistumiselle, mikä on voinut aiheuttaa halkeilua. (EN 13791 & BY 2017).

Betonirakenteen lujuuden arvioimiseksi näytteenottoa tulee olla vähintään kolme ja vaatimuksenmukaisuuden toteamiseksi vähintään 15. Näytteenottokohdat valitaan satunnaisesti ja siten, ettei näytteenoton vaurioittamalla raudoituksilla ole haitallista vaikutusta rakenteen toimintaan. Näytteitä ei oteta silmämääräisesti vaurioituneista kohdista tai alueista, joissa betoni vaikuttaa paikallisesti erottuneelta. (BY 65 2016)

Koekappaleen pituuden ja halkaisijan suhde (L/D-suhde) tulee olla  $1 \pm 0,5$  %. L/D-suhteella on useiden tehtyjen tutkimusten perusteella huomattava vaikutus puristuslujuustuloksiin (Haavisto & Laaksonen 2018)



Kuva 13 L/D-suhteen vaikutus puristuslujuuteen pienillä betonilieriöillä (Haavisto & Laaksonen 2018)

Arviot porakappaleen halkaisijan vaikutuksesta puristustuloksiin ovat asiasta tehdyn kirjallisuuskatsauksen (Haavisto & Laaksonen 2018) perusteella ristiriitaisia. Osassa tapauksissa pienillä lieriöillä on saatu suurempien lieriöiden kanssa yhteneviä tuloksia, kun taas joissain tutkimuksista pienten lieriöiden tulokset ovat selvästi matalampia. Näissä tutkimuksissa on arvioitu, että pienemmät näytteet vaurioituvat porattaessa suhteessa suurempia enemmän. Toisaalta on päätelty, että suurempaan näytteeseen sattuisi keskimäärin enemmän luontaista vaihtelua, erottumista ja siten aiemmin murtuvia hauraita kohtia. Pienten lieriöiden kohdalla hajonnan on todettu usein kuitenkin kasvavan astetta suurempia lieriöitä suuremmaksi.

Puristuslujuuden koestus tehdään lähtökohtaisesti 28 vuorokauden iässä (SFS-EN 12504-1). Betonin arviointi-ikä voi olla lujuudenkehitystä hidastavien seosaineiden perusteella määriteltä myös 91 vuorokautta. Koekappaleiden pinnoille on asetettu vaatimukset standardissa SFS-EN 12390-1. Porakappaleista saadut puristuslujuustulokset muunnetaan 150 mm kuutiolujuustuloksiksi. Betonin kosteuspitoisuus vaikuttaa mitattuun lujuuteen ja ero ilmasäilytyksen ja vesisäilytyksen välillä olla 10-15 %. Tästä syystä porakappaleet tulee säilyttää yhtenevissä olosuhteissa. (SFS-EN 13791, Annex A).

Betoniyhdistyksen ohjeen (2017) mukaan puristuskokeen yksittäiset tulokset hylätään, mikäli yksittäinen koetulos on huomattavan alhainen tai kappaleessa fyysinen vaurio. Lähtökohtaisesti koekappaleet eivät saa sisältää raudoitusta tai muita aineita kuin betonia. Mikäli haittoja ei voida välttää, ne tulee perustellusti huomioida tuloksissa. Betonin porakappaleista tulee poistaa uloin 50 mm tai vähintään suurinta raekokoa vastaava pintakerros ja jokaiselle näytteelle laaditaan yksilöllinen tunnus ja näytteenottopaikka kuvataan (BY 2017).

## 4 Seurantatutkimus: Case Pasilan asemakansi

### 4.1 Tarkasteltava rakenne

Tutkimusaineisto kerättiin Pasilan asema-aukion levennyksen betonirakenteen valutyöstä. Pasilan junaraiteet ylittävä asemakansi on pääosin rakennettu Pasilan aseman rakentamisen yhteydessä 1980-luvun lopussa. Tarkasteltava uusi 440 m<sup>2</sup> valuosa on noin 11 metriä leveä ja 40 metriä pitkä siltarakenne, joka liittyy vanhaan asemakanteen yhdistäen uuden Pasilan aseman ja Triplan kauppakeskuksen sekä hotellin kiinteistöt.



Kuva 14 Havainnekuva Tripla-kaupunkikeskus Pasilassa (YIT Rakennus Oy materiaalipankki)

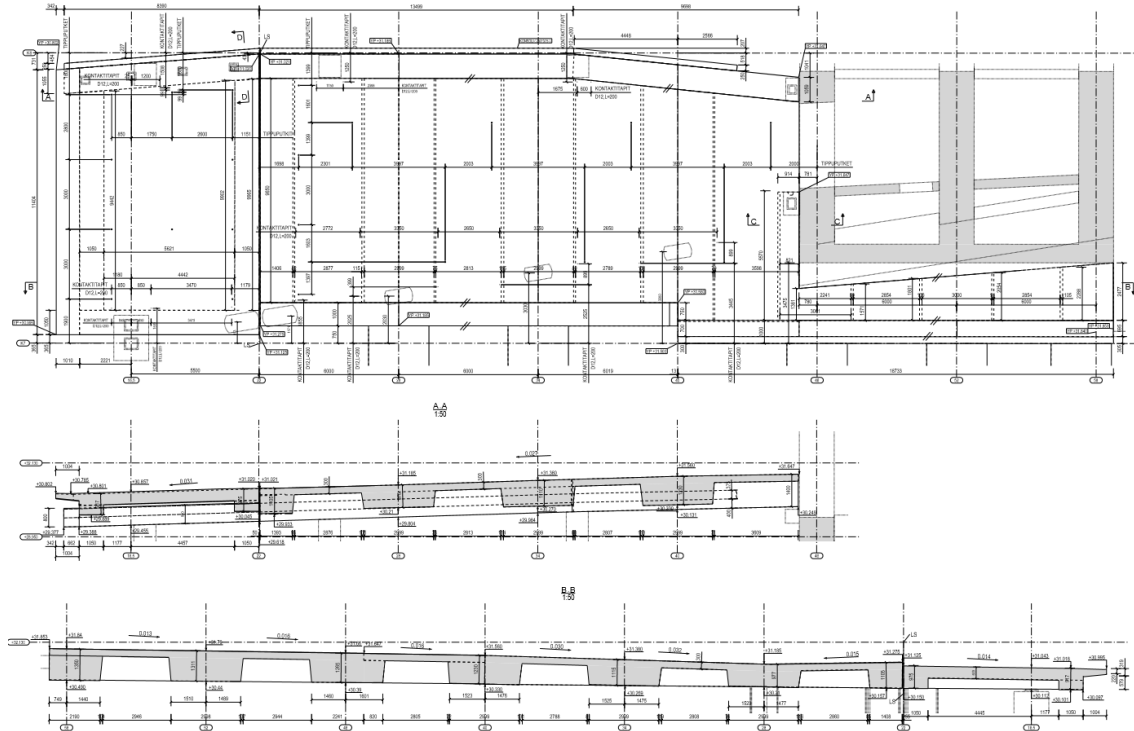
Tarkasteltavan valuosan (kuva 14) laajuus oli 194 m<sup>3</sup>, joka toimitettiin työmaalle yhteensä 21 betoniautokuormassa. Betonoinnissa käytettiin huokostettua P-lukubetonia RO20R2 P30 C35/45 työteknisistä syöistä kahdella eri maksimiraekoolla, jotka muodostavat työssä kaksi havaintojoukkoa. Sideaineena on käytetty sulfaattirasitukseen suunniteltua Finnsementin SR-sementtiä (CEM I 42,5 N SR 3), joka on normaalisti kovettuva portlandsementti. Suhteutus ei sisältänyt seosaineita kuten masuunikuonaa, lentotuhkaa tai silikajauhetta. Rakennosaluokan RO20R2 mukaiset rasitusluokat ovat XC3, XC4, XF2 ja P-lukuvaatimus P30. P-lukuvaatimusta ja betonin lujuusluokkaa on korotettu muiden suunnitteluperusteiden mukaan.

Betoni:	RO20, R2, C35/45-3, P30
Suurin raekoko:	#32
Suunnittelukäyttöikä:	100

v

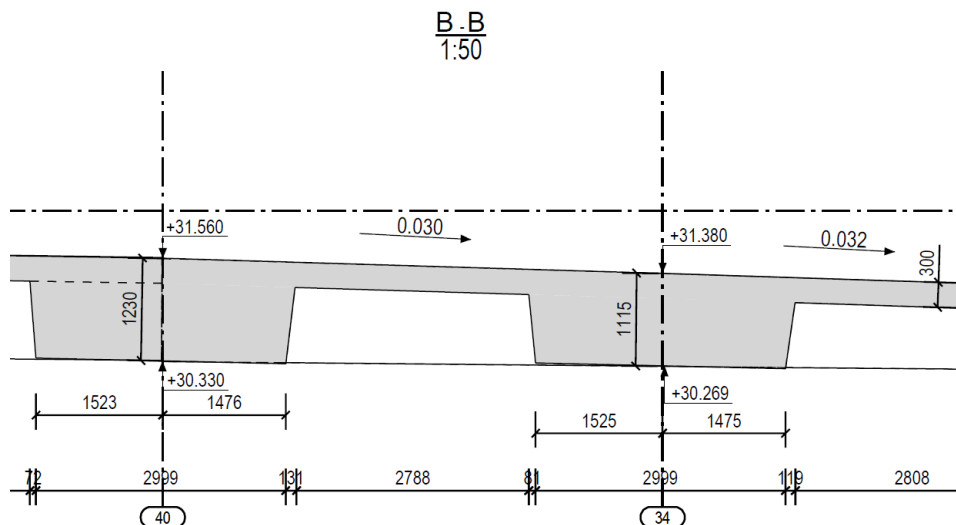
Betoniteräs:	A500HW
Jänneteräs:	Y1860S7-15,7-R1 (relaksaatio <2,5%/1000h)
Betonipeite:	40 mm, koskien myös työteräksiä

Sallittu mittapoikkeama:	± 5 mm	
Pinnan laatuluokka:	InfraRYL 42210.4.4 mukaan	
Seuraamusluokka:	CC2	
Toteutusluokka:	3 / vaativin	(SFS-EN 13670)
Toleranssiluokka:	1 / tavanomainen	(SFS-EN 13670)



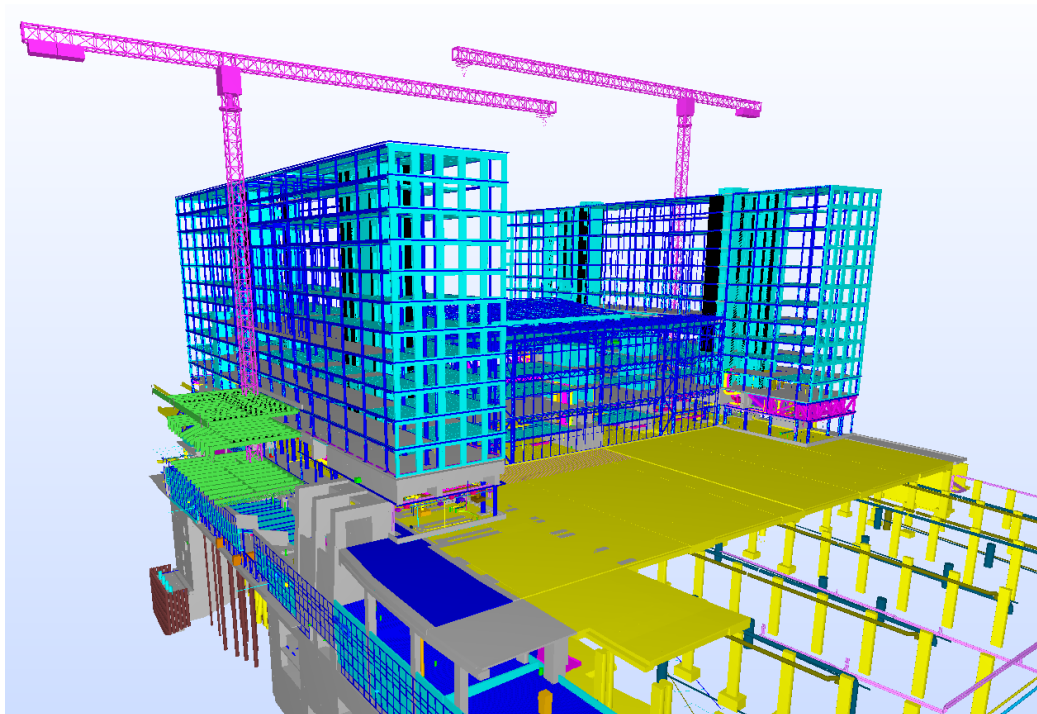
Kuva 15 Asemakannen levennyksen mittapiirustus (Sweco RA\_S\_TR01M179)

Rakenne koostuu kuuden metrin moduulivälein suunnitelluista kolme metrin levyisistä jälkijännitettävistä palkeista, joiden korkeus vaihtelee 1000-1300 mm välillä. Palkkien väleissä yläpinnassa sijaitsee yhtenäinen 300 mm kansilaatta, jonka betonin ominaisuuksiin tämä tutkimus erityisesti keskittyy. (kuva 14 & kuva 15).



Kuva 16 Detail-kuva palkin- ja laatan mittapiirustuksesta





**Kuva 17 Asemakannen pohjoinen levennysosa (kuvan alareunassa vasemmalla sininen)**

Julkisia teitä, siltoja ja aluerakenteita rakennettaessa on noudatettava myös InfraRYL 2006 osa 3 Sillat ja rakennustekniset osat -julkaisua sekä Liikenneviraston ohjetta Siltabetonien P-lukumenettely (2016). Siksi tutkimuskohteessa betonin valmistaja oli velvoitettu toimittamaan tilaajalle etukäteen betonin suhteutustiedot, betonireseptin ennakkokokeiden tulokset ja todentamaan käytettävien lisäaineiden yhteensopivuuden (InfraRYL 42020.1.1.4.3).

Työmaalla betonointityössä noudatettiin lisäksi rakennesuunnittelun rautatieympäristöön liittyvien betonirakenteiden laadunvalvonnasta antamia ohjeita. Ohjeiden laatimisessa oli huomioitu Liikenneviraston 18.11.2016 ohjeistus tehostetuista laadunvalvontatoimenpiteistä. Kutakin arvosteluerää kohden tuli valmistaa vähintään 6 työmaakoe-kappaletta + 1 koe-kappale alkavaa 100 betoni-m<sup>3</sup> kohti. Kaikki koe-kappaleet tuli säilyttää työmaalla standardiolosuhteissa ja testata virallisessa koestuslaitoksessa. (Sweco 2017).

## **4.2 Tutkimussuunnitelma**

Betonin valmistuksesta ja betonoinnista laadittiin työsuunnitelma, joka käytiin läpi työn mittauksiin osallistuneiden betonimyllärien ja betonilaboranttien kesken. Heille perehdyttiin tutkimuksen tavoitteet ja ennalta arvioiden suurimmat virhelähteet.

- Ilmamäärämittaus tehtiin painemittarimenetelmällä (SFS-EN 12350-7).
- Tiheyden mittaamiseen käytettiin 8L ilmamäärämittarin astiaa (SFS-EN 12350-6).
- Kirjaustarkkuudeksi määritettiin ilmamäärälle 0,1 % ja tiheydelle 1 g
- Betonin tiivistäminen yli ilmamittausastiasta kiellettiin ja koe-kappaleista vältettiin.
- Betonin tiivistämistä ja näytteenottoa hoitivat kussakin mittauspisteissä samat henkilöt

Valmistettua betonia pyrittiin seuraamaan jokaisesta kuljetuserästä, jotka kukin on merkitty yksilöidyllä kuormakirjanumerolla. Yksi kuljetus koostui valmistuksessa 2-4 sekoitusannoksesta.

### 4.2.1 Toiminta betoniasemalla

Betonin suhteutuksen muuttaminen kiellettiin valmistuksen aikana ja annosten sekoitusajaksi pyrittiin ohjaamaan valmistuksessa mahdollisimman tasaiseksi. Asemalla valmistetut kuormanumerot kirjattiin ylös annosraporttien keräämistä ja analysointia varten.

Betoniaseman näyte otettiin betoniauton perästä purkaen kuorman valmistuttua. Betoniauton säiliö pyöri valmistuksen ajan, minkä myötä valmistuserät pääosin sekoittuivat. Tässä tutkimuksessa oletetaan valmistuserien sekoittuneen. Betoniaseman laborantti määritteli kullekin kuormalle ilmamäärän ja tiheyden. Tutkimuksessa valmistettiin normaalin laadunvalvonnan koekappale kalibroituun 150 x 300 mm teräslieriömuottiin jokaisesta valmistetusta betonikuormasta. Betoniasemalla valmistetut laadunvalvontakappaleet toimitettiin valua seuraavana päivänä Ruskon Betonin Tuusulan tehtaalle, missä ne säilytettiin standardinmukaisessa +20 +2 °C vesiastiassa. Betoniaseman koekappaleet tasoitettiin hiomalla ja puristettiin 28 vrk ikäisinä 18.1.2018. Lieriökoekappaleiden puristuslujuudet on muutettu RakMK B4:n mukaisesti särmältään 150mm kuutiokoekoekappaleen K-puristuslujuudeksi.

Etukäteen tunnistettuja tuloksiin vaikuttavia tekijöitä:

1. annostelutarkkuus ja tapahtuva vaihtelu
2. sääolosuhteet, kiviaineksen muuttuva kosteus
3. sementin, seosaineiden, lisäaineiden ja kiviaineksen materiaali poikkeamat
4. suhteutusvirheet tai muutos suhteutetussa betonireseptissä
5. näytteenoton edustavuus

Betoniasemien annostelulaitteille on määritetty +/- 3 % annostelutarkkuus (EN 206). Betoniasemien vaatimukset ovat tietokoneohjattuja ja annostelutulokset näytetään betonin valmistavalle prosessinhoitajalle prosessinhallinnassa. Annostelutarkkuuden alituksesta tai ylityksestä ohjelmisto ilmoittaa erikseen kuitattavalla virheilmoituksella, joka pysäyttää valmistuksen, kunnes prosessinhoitaja on tehnyt ratkaisun annosteluvirheen korjaamisesta esim. lisäämällä seokseen ylimääräistä sementtiä. Tässä tutkimuksessa tarkasteltavalla asemalla annostelun alitukset on estetty siten, että vaakaohjelmisto sallii vain suhteutuksen ylityksiä.

Betonin annostelun vesimäärä ei täsmälleen ole tiedossa, koska kiviaineksen kosteutta ei pystytä seuraamaan reaaliaikaisesti ja luotettavasti. Runkoaineen kosteuden muutokset ja vaihtelu sementin vedentarpeessa korjataan annostukseen syötettävällä lisävedellä. Lisäveden määrä kirjautuu annosraporttiin, mutta sen annostelu perustuu prosessinhoitajan silmämääräiseen tilannearvioon ja betonisekoittimen ilmoittamaan vastusarvoon.

Betonin annosraporttien tarkasteluissa on huomioitu, että annoksiin punnitut raaka-aineet ylittävät nimellisen 1,0 m<sup>3</sup> kuutiotilavuuden ja tämän vaikutus tiheyteen on huomioitu.

#### 4.2.2 Toiminta työmaalla

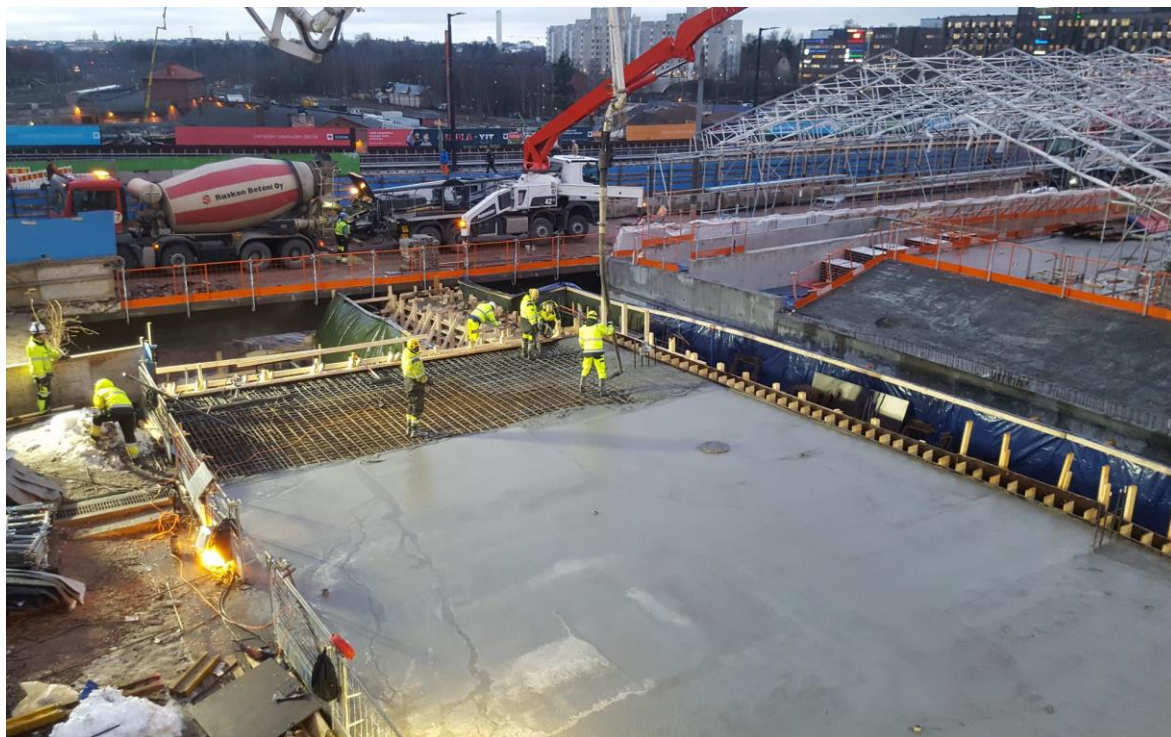
Työmaalla pyrittiin noudattamaan tavanomaisia työmaakäytäntöjä huomioiden kuitenkin asiat, jotka vaikuttavat tutkimuksen luotettavuuteen. Tulokset kirjattiin betonivalmistajan omiin valmistuksen ja työmaavalvonnan pöytäkirjoihin. Laadunvalvontaa ja betonointityötä valvottiin koko tutkimuksen ajan.

Työmaanäytteet otettiin betoniauton perästä ennen pumppausta työturvallisuussyistä.

Betonointityötä seurattiin työmaalla ja edistymistä dokumentoitiin valokuvaamalla siten, että kunkin kuorman purkupaikka tunnetaan kohtuullisella tarkkuudella. Betoniauton saapumis- ja poistumisaika kirjattiin betoniläheteeseen ja tästä muistutettiin kuljettajia, mikä mahdollisti kuormien toimituksen seuraamisen ja ristiin tarkastuksen.

Etukäteen tunnistettuja tuloksiin vaikuttavia tekijöitä:

1. betonin ilmamäärän muutokset kuljetuksen aikana
2. betonin ilmamäärän muutokset pumppauksen aikana
3. betonin lisänotkistaminen työmaalla
4. betonin tiivistyksen työvirheet
5. betonin jälkihoidon työvirheet
6. betonin heikko tai liiallinen tiivistäminen koekappalemuotissa
7. liiallinen tiivistys ja astian ylitäyttö ilmamittauksen yhteydessä
8. vesisade tai muut sääolosuhteiden vaihtelut



Kuva 18 Kuva rakenteen valutyöstä (Pyörny)

Voimassa olevien Betoninormien, Infra RYL:in tai P-lukumenettelyn laadunvalvontaohjeet eivät edellyttäneet betonin tiheyden mittaamista rakennuspaikalla. Tiheyden mittaamiseen tarvittava kalusto kuitenkin kuuluu työmaalaborantin varustukseen betonin vaatimuksen mukaisen ilmamäärän tarkistamista varten ja vaaka kuitubetonien kuitumäärien punnitsemista varten. (Ruskon Betoni 16.11.2017) Siksi tiheyden mittaamiseen rakennuspaikalla muun laadunvalvonnan ohessa ei ole ilmeistä estettä eikä se aiheuta suoria lisäkustannuksia.

Tutkimuksessa valmistettiin normaalin laadunvalvonnan koekappaleita tihennetyllä menetelmällä työmaalla yhteensä 12 eri betonikuormasta. Suunnitelmien mukaisten määräysten täyttäminen olisi edellyttänyt 7 kpl työmaakoekappaletta, joten laajuutta oli lisätty. Työmaan koekappaleet valmistettiin 150 x 300mm kalibroituhiin teräksisiin lieriömuotteihin. Työmaakoekappaleet säilytettiin muotista purkamisen jälkeen työmaalla standardinmukaisessa +20 +2 °C vesiastiassa ja siirrettiin puristusta varten VTT:n Otaniemen testauslaboratorioon. Työmaakappaleiden puristuspinnat tasoitettiin rikkilaastilla ja puristettiin 28 vrk ikäisinä 18.1.2018.

Lieriökoekappaleiden puristuslujuudet on muutettu RakMK B4:n mukaisesti särmältään 150mm kuutiokoekoekappaleen K-puristuslujuudeksi ja tiheys on määritetty toimitustilassa 1 mm tarkkuudella mitatuista ulkomitoista. (VTT Testauseloste VTT-S-218-18 & VTT-S-219-18). Normikoekappaleiden toteutunutta ilmamäärää ei pyritty selvittämään.

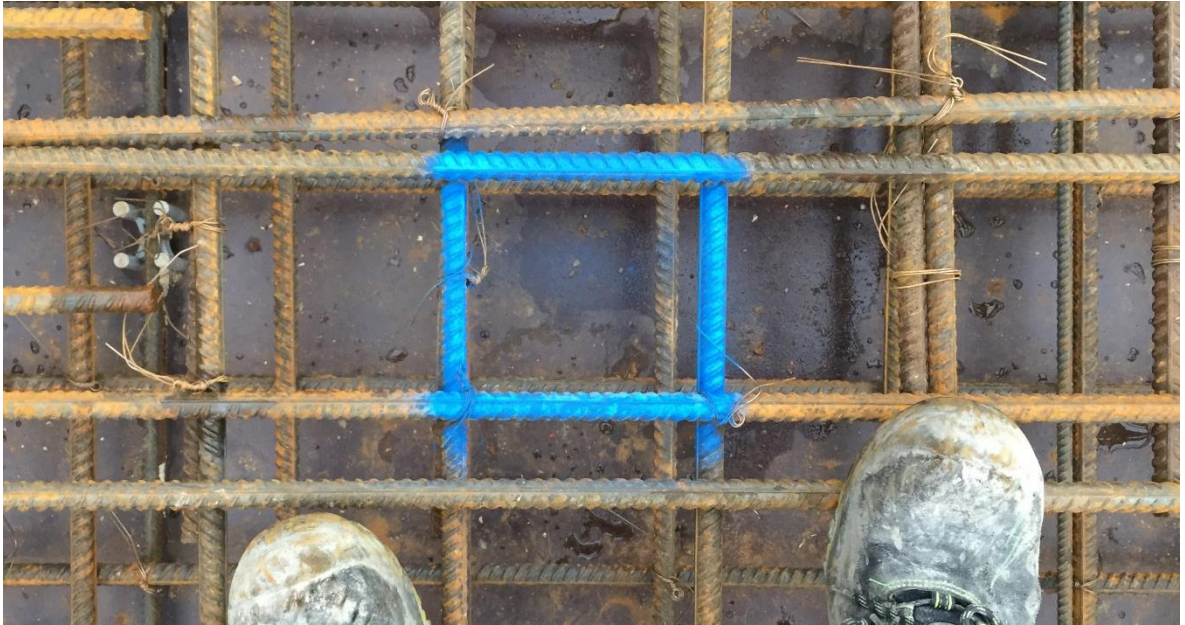
#### **4.2.3 Toiminta rakennekoekappaleiden valmistamiseksi**

Valmiista betonirakenteesta timanttiporattiin 18 kpl koelieriöitä siten, että ne edustaisivat mahdollisimman kattavasti kansirakennetta ja mahdollisimman useaa eri betonikuormaa. Näytteenottokohdat suunniteltiin etukäteen verkkoraudituksen avoimiin 150 mm x 150 mm ruutuihin. Näytepisteiden valinnassa lähtötietona käytettiin rakennesuunnittelijan ohjetta säilyttää palkit vauriottomina ja hyödyntää kaistaleita 1/3 laattaosuuden jännevälistä, missä rakenteet rasitukset ovat vähäisimmät. Tällä järjestelyllä rakenteelle aiheutettava vaurio oli hyväksyttävä ja ehjien porakappaleiden valmistaminen helpottui.

Näytteenottopaikkojen koordinaatit tarkemmitattiin työmaan x,y,z-koordinaatistoon yläpinnan raudituksen kulmapisteistä ja tavoitellusta porauspisteestä (kuva 21).

Rakennekoekappaleet timanttiporattiin järjestelmällisesti ja yksilöitiin kappaletunnuksella sekä kappaleen ala- ja yläpinnat osoittavilla kirjaintunnuksilla A ja Y. Porakappaleet valmistettiin kahtena peräkkäisenä työpäivänä, säilytettiin sama aika työmaaolosuhteissa ja kuljetettiin koeistulaitokselle. Porakappaleet oli säilötty kuljetuksen ajaksi uudelleensuljettaviin muovipusseihin käsittelyn helpottamiseksi.



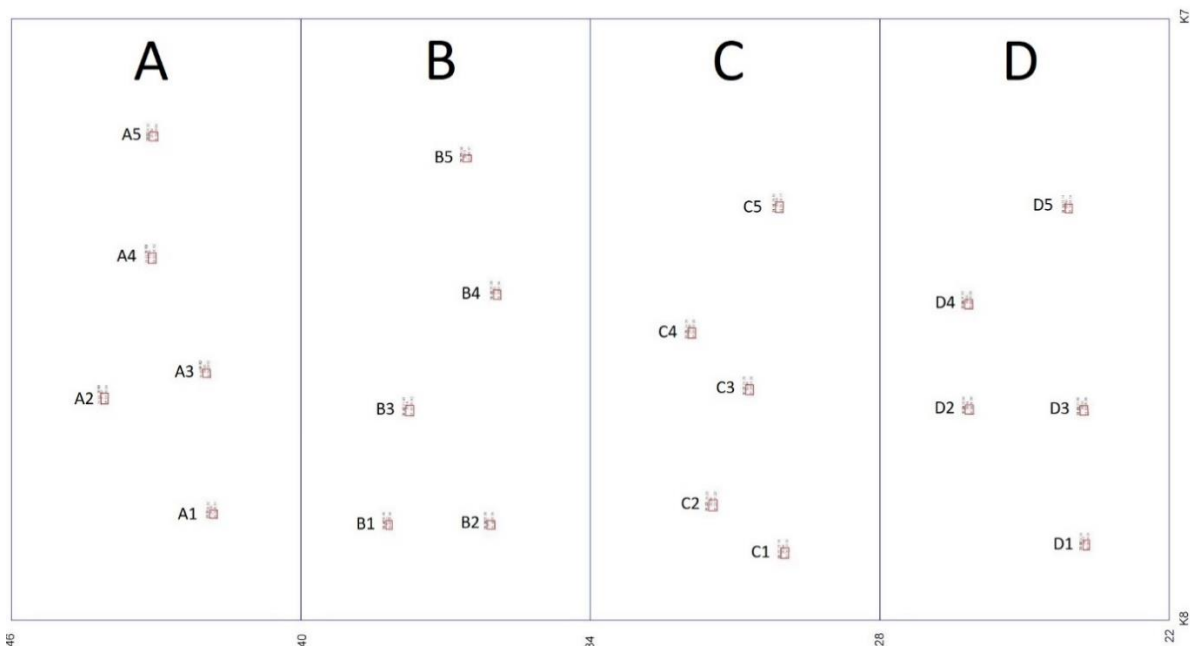


Kuva 19 Poranäytepisteiden valinta tehtiin raudoitusvapaita sijainteja käyttäen (Pyörny)



Kuva 20 Työmaalla käytettiin tarkkoja mittauksia ja yläpuolelta kiinnitettyä timanttiporaa (Pyörny)

Porakappaleiden toteutunut halkaisija oli keskimäärin 96 mm ja pituus 309 mm. Liitteessä 3 on esitetty lista rakennekoekappaleista.

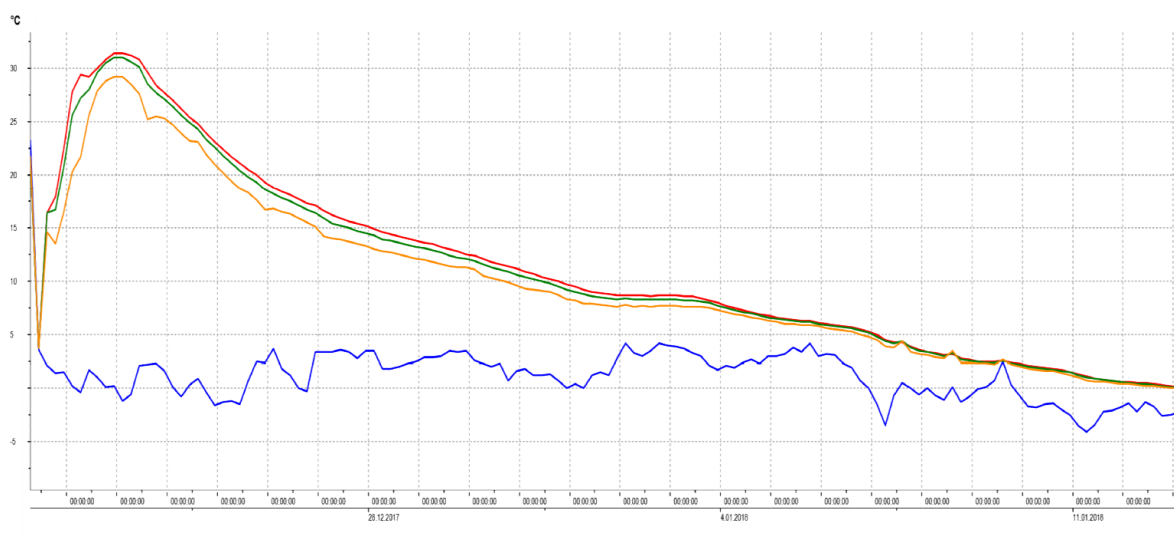


Kuva 21 Näytteenottopisteiden sijainnit rakenteessa (Liite 2).

### 4.3 Rakenteen kypsyysikä ja poranäytteiden puristusajankohta

Tutkimus ja valutyö suoritettiin talvibetonointiaikana joulukuussa (21.12.2017) ja betonoitavan holvin alapuolista tilaa lämmitettiin maakaasulämmittimellä sementin normaalin hydrataation ja betonin lujuudenkehityksen ylläpitämiseksi. Tarkkaa lämmitystehoa ei tiedetä. Lämmitetyn tilan lämpötilaa säädettiin työmaalla seuratun betonin lämpötilan mukaan. Alapuolisen tilan lämpötila oli tutkimuksen aikana 15-30 °C.

Vallitsevat ulkoilmaolosuhteet, hydraatio ja betonin jälkihoitotavat muodostavat yhteisvaikutuksena betonin lämpötilan, joka haluttiin tietää. Valu varustettiin Testo 176 T4 -mittalaitteella lämpötilaolosuhteiden tallentamiseksi. Lämpötilatietoa kerättiin neljästä pisteestä: ulkoilmasta (1.1), 50 mm laatan yläreunasta (1.2), laatan keskeltä (1.3) ja 50 mm laatan alareunasta (1.4). Lämpötilamittaus sijaitsi sektorissa A näytepisteiden A4 ja A5 välissä.

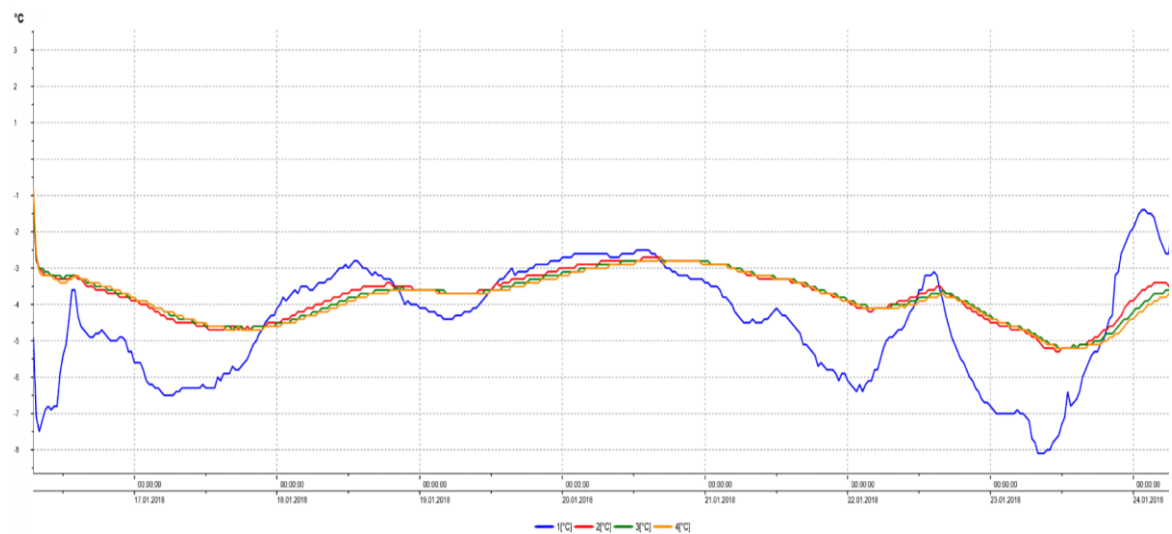


Kuva 22 Betonirakenteen lämpötila 21.12.2017-16.1.2018

Ulkoilman lämpötila vaihteli valua seuranneen 28 vuorokauden aikana 4,2 °C ja -7,6 °C välillä keskiarvon ollessa noin 0,5 °C (kuva 22). Rakenteen lämmittämistä alapuolisen tilan kautta jatkettiin 10 vrk ajan.

Betonin lämpötila nousi tarkkailuajankohtana korkeimmillaan 31,4 °C ja saavutti korkeimman lämpötilansa noin 36 h valamisen jälkeen. Lämpötilan käyttäytyminen muistuttaa muodoltaan kuvassa 14 esitettyä sementin lämmöntuoton kuvaajaa. Ulkopuolisen lämmityksen ja suurimman hydrataatiolämmön vapautumisen jälkeen betonin lämpötila alkoi laskea tasaisesti.

Betonin lämpötila laski kaikissa mittauspisteissä alle 5 °C noin 17 vuorokauden jälkeen 7.1.2018 ja edelleen alle 0 °C lämpötilan noin 24 vuorokauden jälkeen 14.1.2018 (kuva 22). Betonin lujuuden kehityksen 17d jälkeen voidaan katsoa olleen vähäistä ja 24d jälkeen hyvin vähäistä.



**Kuva 23 Betonirakenteen lämpötila 16.1-24.1.2018**

Ajanjaksolla 14.1-24.1 lämpötila kaikissa mittauspisteissä oli yhtäjaksoisesti negatiivinen - 0,1...- 8,0 °C. Rakenteen lämpötilojen voidaan havaita seuranneen luotettavasti ulkolämpötilan kehitystä vuorokauden vaihtelujen mukaan (kuva 23).

Tutkimuksen tavoitteena oli verrata puristuslujuuden kehittymistä saman betonierän betoniaseman, työmaan ja rakennekoekappaleissa. Betoniaseman ja työmaan koekappaleet säilytettiin 20°C+- 2 vesialtaassa. Normaaliolosuhteissa betoni saavuttaa tavoitelujuutensa 28 vuorokaudessa. Standardin EN-13791 mukaisesti betonin ikä on otettava huomioon puristuslujuuslujuutta määritettäessä, vaikka lujuus on sallittua määrittää minkäikäisenä tahansa. Vertailukelpoisuuden parantamiseksi poranäytteitä varten selvitettiin betonirakenteen todellinen kypsyyssikä eli lämpötilan ja reaktioajan yhteisvaikutus.

Kypsyyksiän arvioimiseksi käytetään usein Sandgrove-menetelmää (BY 2018)

$$t_{20} = \left( \frac{T+16^{\circ}\text{C}}{36^{\circ}\text{C}} \right)^2 * t \quad (8)$$



missä  $t_{20}$  on betonin kypsyysikä [d]  
 $T$  on betonin lämpötila aikana  $t$  [°C]  
 $t$  on betonin kovettumisaika [d]

Tähän tutkimukseen saatiin toinen kypsyysikäarvio suoraan Finnsementti Oy:ltä Betometri-ohjelmistolla, joka perustuu valmistajan omaan tuote- ja tutkimustietoon. Lähtötietoina laskennassa käytettiin 390 kg sementtimäärä (SR-sementti), toteutunut v/s-suhde heikoimman tilanteen mukaan 0,42 ja mitattua ilmamäärää työmaalla 5,25 %.

Näytteet porattiin rakenteesta noin 40d vuorokauden ikäisiä (29.1-30.1.2018). Kypsyysikäarvioissa näytteiden säilytystä autossa, siirtoa työmaalta testauslaboratorioon, valmistelua laboratoriossa, siirtämistä vesialtaaseen ja lämpiämistä vesialtaassa kuvattiin yksinkertaistusti olettamalla 1 vrk (31.1.2018) lämpötilaksi 0,2 °C vuorokauden ajan ja 1.2 eteenpäin betonin lämpötilaksi määritettiin vesialtaan lämpötila 20 °C.

**Taulukko 3 Tarkastellun valun kypsyysikäarvio laatan keskiosan mittauspisteessä**

Kypsyysikä	Sandgrove	Finnsementti
21.12.2018-13.1.2018 lämpötila laskenut < 0°C	12,9 vrk	15,1 vrk
18.1.2018 valuajankohdasta 28d	13,7 vrk	16,7 vrk
30.1.2018 porattaessa valuajankohdasta 40d	15,0 vrk	19,5 vrk
7.9.2018 puristettaessa valuajankohdasta 49d	23,7 vrk	28,1 vrk

Poralieriöt siirrettiin työmaalta pakkasesta lämpimään koeistuslaboratorioon 40 vrk ikäisinä. Tehtyjen kypsyysikäarvioiden perusteella (taulukko 3) poranäytteiden päätettiin antaa kehittää lujuutta 9 vuorokauden ajan 20 °C lämpötilassa ennen niiden koeistamista. Puristuskoekkeet tehtiin kappaleille 49 vrk iässä. Kappaleiden lujuudenkehitys ei välttämättä jatkunut täysin vertailukelpoisesti, kun kappaleet jäätymisen jälkeen oli siirretty optimilämpötilaan. Myös laaditut kypsyysikäarviot ovat parhaita mahdollisia arvioita.

#### **4.4 Poranäytteiden puristuslujuuden koestus**

Poralieriötä säilytettiin laboratoriossa standardinmukaisessa 20°C± 2 vesialtaassa 6 vrk ajan, minkä jälkeen ne sahattiin puristuslujuuskoekappaleiksi. Kustakin poranäytteestä valmistettiin kaksi puristuskappaletta: yksi näytteen yläpinnasta ja toinen alapinnasta. Näytteiden ylä- ja alapinnoista poistettiin vaurioitunut pinta n. 10 mm. Puristuskappaleet valmistettiin siten, että korkeuden ja halkaisijan suhde oli noin 1.

Sahauksen ja porauksen valmistelun jälkeen koekappaleita kuivattiin 3 vuorokautta huoneilmassa standardin SFS-EN 13791 ohjeen mukaisesti ennen testausta. Vesiupotettujen kappaleiden puristustulokset ovat standardin liitteen arvion mukaan 10-15 % matalampia. Betoninäytteen korkea kosteuspitoisuus laskee merkittävästi betonikappaleen puristuslujuustulosta. Betonin huokosiin absorboitunut vesi pyrkii puristustilanteessa poistumaan huokosista, mikä kasvattaa jännityksiä rakenteessa (Haavisto & Laaksonen 2018).

Tätä tukevat myös VTT:n epäviralliset havainnot, missä standardinmukaisen puristuskoekappaleen 3 vrk kuivatus lisäisi puristuslujuutta testattaessa noin + 13 % (Klami, haastattelu 7.9.2018).



**Kuva 24 Porakappaleista valmistettiin timanttisahaamalla kaksi puristuskappaletta (Pyörny)**

Koekappaleet punnittiin sahauksen jälkeen pintakuivina 6.2.2018 ja puristuspäivänä 9.2.2018. Koekappaleita kuivattiin 3 vrk ennen puristuskoea, minkä aikana kappaleista poistui vettä keskimäärin  $13 \text{ kg/m}^3$  eli noin 1,5 %. Kappaleille määritettiin myös tiheys mitattujen ulkomittojen perusteella. Testauspäivänä koekappaleiden puristuspinnat tasoitettiin rikkilaastilla aamupäivällä ja kappaleet puristettiin iltapäivällä.

Rakenteesta porattujen koekappaleiden puristuslujuudet määritettiin standardin ”SFS-EN 12390-3 kovettuneen betonin testaus” -mukaisesti ja muutokseen kuutiolujuuksiksi on käytetty Betoninormi 2016 kohdan 5.2.3.2 muutuskertoimia. Puristuskokeet tehtiin VTT Expert Services Oy:n hydraulisella Toni Technik -puristimella, jonka suurin puristuskapasiteetti on 5000 kN.

Kokonaisuutena poranäytteiden valmistusta häiritsivät teräsjäämät yhteensä 8 näytteessä 18 kappaleesta. Useimmat teräksistä olivat työmaalla raudoituksessa käytettyjä työteräksiä, jotka sitovat ylä- ja alapinnan verkot yhteen siten, että niiden päällä voidaan valuvaiheessa kävellä vaurioittamatta raudoitusta. Muutamat porauksista osuivat myös laatan alapinnan teräksiin tarkemmittauksesta huolimatta.



Kuva 25 Koekappaleiden puristamiseen käytetty Toni Technik -mittalaite (Pyörny)

#### 4.5 Paineekyllästyskappaleen tiheyden ja ilmamäärän määrittäminen

Porakoe-kappaleiden ilmamäärä ja tiheys määritettiin soveltamalla standardin SFS 4475 mukaista suojahuokoskoetta. Menetelmässä selvitettiin betonikappaleen massa toimitustilassa sekä kolmessa tutkimustilassa: täysin kuivattuna, huokostilavuus normaalipaineessa vedellä kyllästettynä ja huokostilavuus 15 Bar ylipaineessa vedellä kyllästettynä.

1. Ensimmäisessä vaiheessa koekappaleet kuivataan 105 °C lämpökaapissa, kunnes kaikki kosteus betonin huokosrakenteesta on poistunut. Näyte todetaan kuivaksi, kun kappaleen massan muutos vuorokauden välein suoritetuissa mittauksissa on korkeintaan 0,5 %. Tämän jälkeen kappale jäähdytetään 24 ± 2 °C lämpötilassa vuorokauden ajan ja punnitaan. (SFS 4475).

$W_{d,i}$

kappaleen paino lämpökaapissa kuivattuna

2. Toisessa vaiheessa koekappaleet varastoitetaan normaalipaineessa 20 ± 2 °C veteen siten, että alussa ¼ koekappaleesta on vedessä. Vettä lisätään kahden tunnin kuluttua siten, että ½ koekappaleesta on vedessä. Seuraavan kahden tunnin kuluttua vettä lisätään siten, että ¾ koekappaleesta on vedenpinnan alapuolella. Vuorokauden kuluttua vettä lisätään siten, että koekappaleet ovat kokonaan vedenpinnan alapuolella. Koekappaleet todetaan kyllästyneiksi, kun kappaleen massan muutos vuorokauden välein suoritetuissa mittauksissa on korkeintaan 0,5 %. (SFS 4475).

Tässä tutkimuksessa vettä lisättiin kahdessa osassa siten, että 24 h kuluttua kappaleet peitettiin kokonaan. Ohjeellisia tuntiaikoja ei noudatettu. Kappaleiden kyllästys vedessä kesti 28 vrk, mikä on pidempään kuin painon tasaantuminen edellyttäisi. Näillä muutoksissa ei arvioitu olevan merkittävää vaikutusta kokeen tuloksiin.

$W_{sat.i}$	kappaleen paino ilmassa, kyllästettynä vedessä
$W_{sat.uw}$	koekappaleen paino ilmassa, kyllästettynä vedessä

3. Kolmannessa vaiheessa koekappaleet sijoitettiin paineastioihin, jotka täytettiin vedellä ja joissa vedenpaine korotettiin ulkoisen pumpun avulla 15 +/-1,5 Bar vuorokauden ajaksi. Järjestelmä ylläpiti koeastioissa jatkuvasti valittua painetta.

Koekappaleet asetettiin paineastioihin kahdessa erässä 25.4 - 26.4. sekä 15.5 - 16.5. Paineekyllästyksen päätyttyä koekappaleet siirrettiin vesiastiassa punnituspisteelle, jossa niiden massa määritettiin ilmassa ja vedessä.

$W_{pk.i}$	kappaleen paino ilmassa 24h 15bar painekyllästyksen jälkeen
$W_{pk.uw}$	kappaleen paino vedessä 24h 15bar painekyllästyksen jälkeen

Betonikappaleen ilmamäärä määritettiin yhtälöä 9 (Al-Neshawy 2018) käyttäen:

$$Ilmamäärä_{pkk} = \frac{W_{pk.i} - W_{sat.i}}{W_{sat.i} - W_{sat.uw}} * 100 (\%) \quad (9)$$

missä

$W_{sat.i}$	koekappaleen paino ilmassa, kyllästettynä normaalipaineisessa vedessä
$W_{wp.i}$	koekappaleen paino ilmassa 24h 15bar painekyllästyksen jälkeen
$W_{wp.uw}$	koekappaleen paino vedessä 24h 15bar painekyllästyksen jälkeen

Paineekyllästyskappaleen tiheytenä käytettiin kapilaarisesti kyllästyneessä tilassa olevan kappaleen tiheyttä, joka määritettiin kappaleen 3.3 yhtälön 5 mukaan.

$$\rho_{pkk.sat} = \frac{W_{sat.i}}{W_{sat.i} - W_{sat.uw}} * 998 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (10)$$

Kapilaarisesti kyllästyneessä tilassa tulosten arvioitiin olevan parhaiten vertailukelpoisia tuoreen betonin tiheyteen verrattuna ja paremmin vertailukelpoisia kuin käytössä olleet huonetilan kosteudessa tai painekyllästetyn kappaleen massojen perusteella määritetyt tiheydet.



## 5 Tutkimustulokset

### 5.1 Betoniaseman tuoreen betonin laadunvalvonta

Betonivalmistuksesta kerättiin talteen kaikkien 69 valmistuserän annosraportit, joiden avulla voitiin varmistua kunkin betonikuorman annostuksista. Annosraporttien kaikki tiedot syötettiin taulukkolaskentaan, mikä mahdollisti tiheyden laskennalliset tarkastelut.

```

PASILA
ANNOSRAPORTTI 15.01.2018 16:05:37

KUORMA 17974: ERÄ 19564: 1/4 21.12.2017 13:21:31
ASIAKAS: (YIT TRIPLA ) TOIMITUS: (TR
IPLA FI6000201 )
RESEPTI 38: (C35/45 16 P30 )
NOTKEUS: S3 KOKO: 3.00
LÄMPÖTILATAVOITE: 14 TEHOTAVOITE: 170 VESIANN. %: 92.0

          LASKETTU  TOTEUTUNUT  KUUTIO  KOSTEUS%
0-8      3136.1    3138.5    1046.2    3.8
8-16     2409.9    2397.1    799.0     0.9

SR        1185.0    1173.7    391.2

KYLmä VESI 42.0    42.2    14.1
KUUMA VESI 264.8    264.6    88.2

MASTERSKY600 9.48    9.48    3.16
MASTER AIR  4.27    4.28    1.43

LISÄVESI: 30.1 HUUHT.VESI: 1.1
LÄMPÖTILA: 16.4 TEHOLUKEMA: 192 SEKOITUSAIKA: 156
TEHOVESI: 466.9 TEHOSIDE: 1173* V/S-LUKU: 0.40

```

**Kuva 26 Esimerkki betoniaseman annosraportista**

Annosraporteista voitiin yleisinä huomioina päätellä, että

1. Betoniaseman järjestelmä ja/tai annostelulaitteet tekevät vähäisiä annosteluvirheitä, joilla ei vaikuta olevan kokonaisuuden kannalta suurta merkitystä. Järjestelmä korjaa itse virheitä pois seuraaviin annostelueriin.
2. Ohjelmisto/laborantti jättää osan reseptiin määritellystä vedestä annostelematta vesiann. %-säädön kautta, mitä voidaan kompensoida valmistuksessa lisäveden annostelun kautta.
3. Annosteluerien sisältämästä kokonaisvesimäärästä ei voida tarkalleen varmistua, sillä sekoituksessa lisätty lisävesi on todennäköisesti seurausta kiviaineksen kosteuspitoisuuden muutoksista ja/tai reseptin alittavasta alkuperäisestä annostelusta. Prosessin notkeusvastus todentaa valmistajalle kokonaisvesimäärän olevan kunnossa.
4. Annostelulaitteiden punnitukset ovat hyvin tarkkoja.



Laskelma teoreettisesta tiheydestä			tilavuuskorjattu	
17952.1 (annosteluera)	määrä [kg]	tiheys [kg/dm <sup>3</sup> ]	tilavuus [dm <sup>3</sup> ]	määrä [kg/m <sup>3</sup> -bet]
sementti	395,0	3,10	127,4	387,8
runkoaines #0-8	1042,1	2,70	386,0	1023,1
runkoaines #8-16	804,1	2,70	297,8	789,5
notkistin	3,2	1,20	2,7	3,1
huokostin	1,8	1,10	1,7	1,8
lisätty vesi	118,5	1,00	118,5	116,3
kiviaineksen kosteus	44,5	1,00	44,5	43,7
absorboitunut vesi	9,2	1,00		9,0
ilmamäärä			40	
		yht.	1018,55	2374 kg/m <sup>3</sup>

Kuva 27 Kuvakaappaus teoreettisen tiheyden määrittämisestä annostelueralle

Hyödyntäen annosteluraporttien tavoitetietoja pystyttiin määrittämään käytetty betoniresepti ja sille ominainen teoreettinen tiheys annoskohtaisesti (kuva 27). Teoreettisen tiheyden määrittämisessä on tehty korjaus betoniannostelun määrästä takaisin tilavuuteen 1,0 m<sup>3</sup>. Kiviaineksen vedenimukykyä ei tarkkaan tunnettu, mutta arviona on käytetty 0,5 % kiviaineksen tilavuudesta. Kiviainekseen absorboitunutta vettä ei ole huomioitu betonin tilavuudessa.

$$\rho_{\text{tiheys.teoreettinen \#16}} = 2375 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{tiheys.teoreettinen \#32}} = 2385 \text{ kg/m}^3$$

Teoreettisten tiheyksien perusteella voitiin huomata, että kuorman 17970 jälkeen molempien reseptien suhteutusta oli muutettu lisäämällä kiviainesten määrää suhteessa sementtiin ja veteen - todennäköisesti työmaalta tulleen palautteen perusteella. Tämä nähdään teoreettisen tiheyden kasvuna noin 8 kg/m<sup>3</sup> (taulukko 4).

Hyödyntäen kuvassa 27 esiteltyä teoreettisen tiheyden laskentatapaa ja soveltamalla toteutuneita annostelumääriä, kullekin valmistetulle betoniannokselle voitiin arvioida myös teoreettinen valmistustiheys eli laskennallinen tiheys valmistukseen käytetyillä määrillä. Tarkastelu toistettiin taulukkolaskentana kullekin betoniannokselle.

$$\rho_{\text{tiheys.valmistus \#16}} = 2340 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{tiheys.valmistus \#32}} = 2355 \text{ kg/m}^3$$

Betoniasemalla valmistettujen kuormien annosteluissa keskinäinen vaihtelu oli vähäistä ja valmistustiheyden keskihajontaa molempien reseptien osalta +/-10-15 kg/m<sup>3</sup>. Toteutuneen annostelun tiheyden ero suhteutuksen mukaiseen tiheyteen on kuitenkin merkittävä. Tilavuusosuuksien muutokset laskevat betonin tiheyttä 30-35 kg/m<sup>3</sup>.

Taulukko 4 Betoniasemalla mitatut kuormakohtaiset tulokset

BETONIASEMA (BA)				Teor.tiheys (tav.annostelu)	Teor.valmistus- tiheys (a) (tot. annostelu)	Mitattu tiheys (b)		$\Delta\rho$ (b-a)	Mitat. Ilma- määrä
nro	kk- nro	m3	#	[kg/m3]	[kg/m3]	[g/8L]	[kg/m3]	[kg]	[%]
1	17952	8	16	2374	2336	18720	2340	4	4,0
2	17953	8	16	2374	2347	18600	2325	-22	4,6
3	17954	8	16	2374	2318	18886	2361	42	3,9
4	17955	12	16	2373	2332	18755	2344	12	3,6
5	17958	8	32	2379	2347	19173	2397	50	3,5
6	17959	8	32	2379	2364	18872	2359	-5	3,3
7	17960	9	16	2373	2364	18875	2359	-5	3,5
8	17961	12	32	2379	2373	18914	2364	-8	3,8
9	17963	8	32	2379	2370	18958	2370	0	3,8
10	17964	8	16	2373	2358	18952	2369	11	3,5
11	17965	9	32	2380	2357	18674	2334	-23	3,3
12	17966	12	32	2380	2357	18882	2360	3	3,5
13	17967	8	16	2373	2347	18400	2300	-47	3,7
14	17970	12	32	2388	2330	18606	2326	-4	4,0
15	17971	8	32	2388	2355	18770	2346	-9	3,5
16	17974	12	16	2381	2327	18557	2320	-7	4,2
17	17975	8	32	2388	2349	18671	2334	-15	3,6
18	17977	8	32	2387	2351	18604	2326	-25	3,8
19	17978	8	32	2388	2349	18907	2363	14	4,0
20	17981	12	16	2381	2323	18900	2363	40	3,9
21	17982	4	16	2381	2354	18645	2331	-24	3,7
#16			x	2376	2341		2341	1	3,9
			s	4	16		22	28	0,3
			min	2373	2318		2300	-47	3,5
			max	2381	2364		2369	42	4,6
#32			x	2383	2355		2353	-2	3,6
			s	4	12		22	21	0,3
			min	2379	2330		2326	-25	3,3
			max	2388	2373		2397	50	4,0

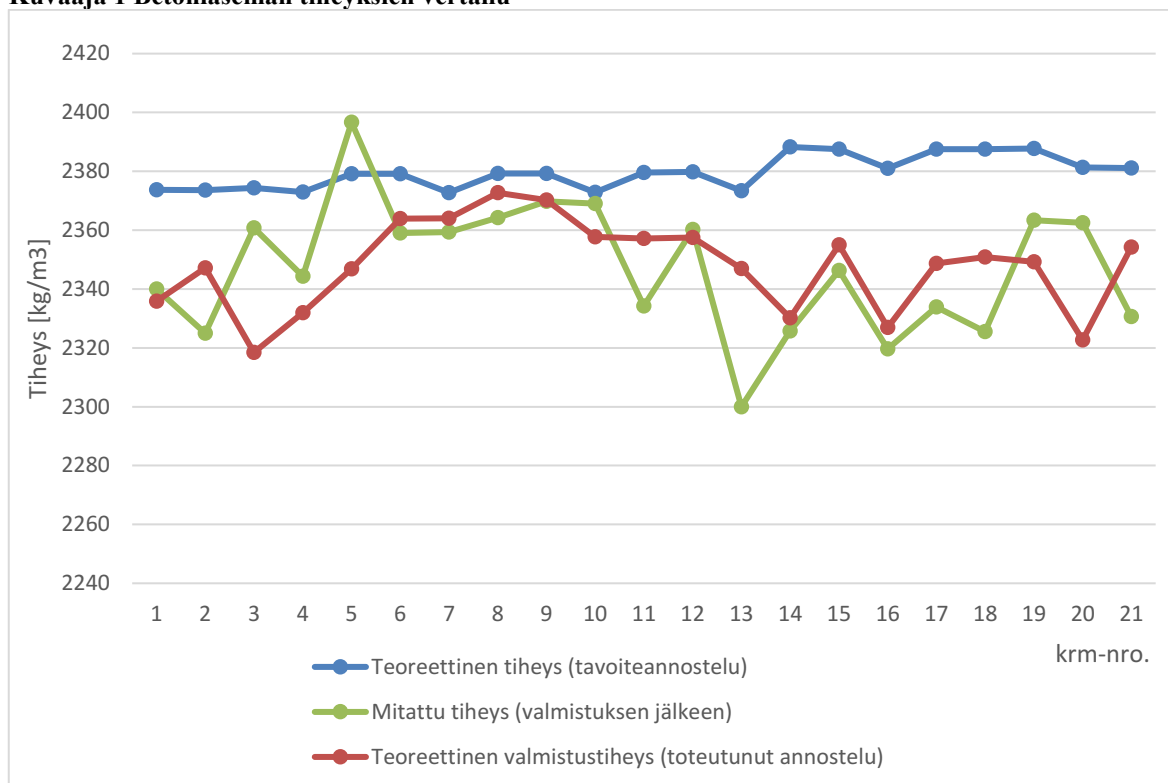
Valmistuksen jälkeen betoniasemalla suoritettussa laadunvalvonnassa määritettiin kaikkien valmistetun 22 betonikuorman tiheys painemittariastian avulla. Suurimman ja pienimmän tuloksen välinen ero tiheydessä 16 mm raekoolla 69 kg/m<sup>3</sup> ja 32 mm maksimiraekoolla 71 kg/m<sup>3</sup> (taulukko 4).

$$S_{tiheys.asema \#16} = S_{tiheys.asema \#32} = \pm 22 \text{ kg/m}^3$$

$$S_{tiheys.asema} = \pm 20 \text{ kg/m}^3$$

Annostelun jälkeen betoni sekoitetaan ja pudotetaan vaiheittain betoniauton kyytiin. Nämä valmistusprosessin vaiheet lisäävät tiheydessä tapahtuvaa vaihtelua ja mittaustulosten perusteella betoniasemalta lähtiessä betonin tiheyden vaihtelu oli keskimäärin +/- 20 kg/m<sup>3</sup>. Tätä arviota voidaan epäillä valmistuksen hajonnan yleiseksi suuruusluokaksi.

**Kuvaaja 1 Betoniaseman tiheyksien vertailu**



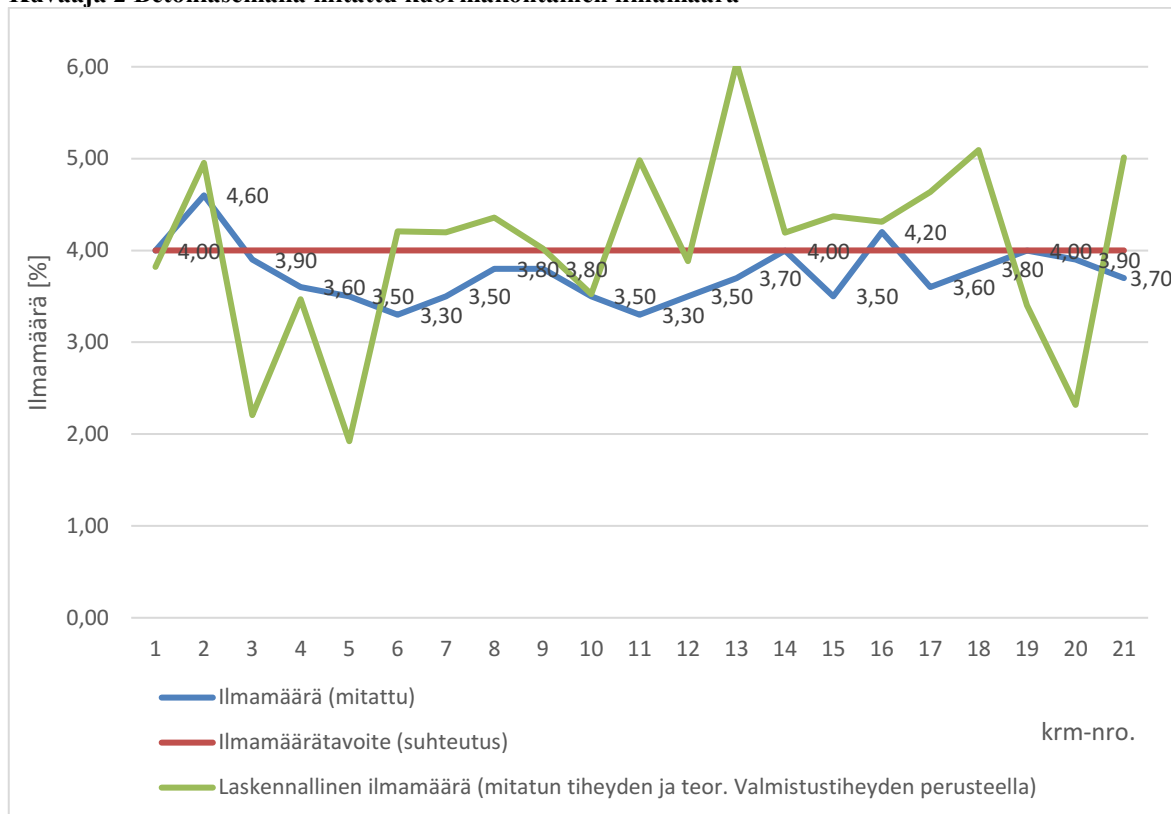
Tilastollisesti teoreettinen valmistustiheys ja mitattu tiheys betoniasemalla vastaavat keskiarvoltaan hyvin toisiaan (taulukko 4) hajonnan ollessa kuitenkin  $\pm 50 \text{ kg/m}^3$  luokkaa. Betonin mitatut tiheydet poikkesivat tavoiteannostelun tiheydestä keskimäärin  $30\text{--}35 \text{ kg/m}^3$ . Tulosten satunnainen vaihtelu oli kaikin puolin suurta. (taulukko 4 & kuvaaja 1).

Toteutuneiden annostelumäärien perusteella määritetty ”teoreettinen valmistustiheys” todettiin parhaaksi käytettävissä olevaksi arvioksi betonin oikeasta tiheydestä ja sitä käytetään vertailuarvona valmistusketjun myöhempien tulosten arvioinnissa.

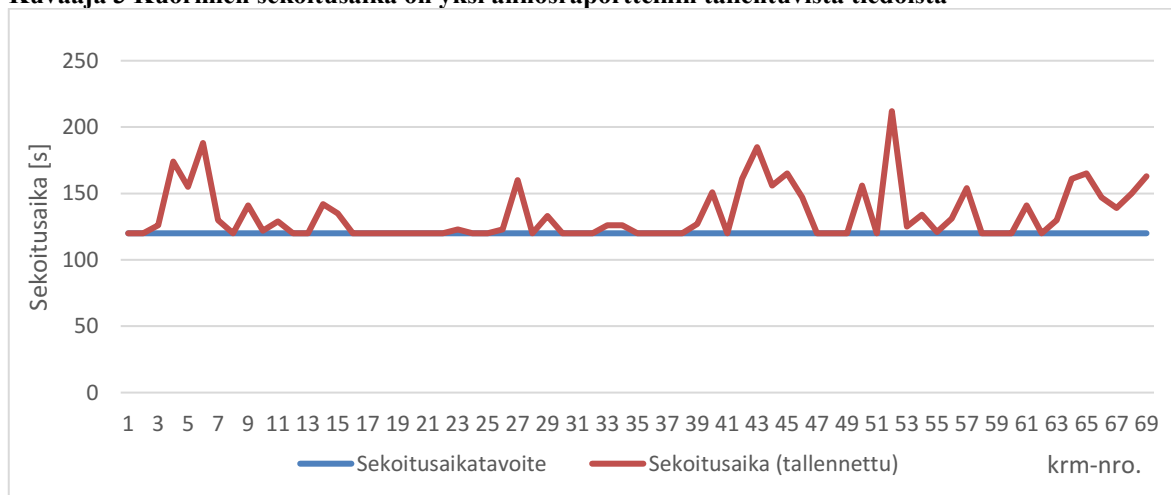
Betonin tiheyden arvo on riippuvainen betonin vallitsevasta ilmamäärästä, sillä ilmamäärän kasvaessa itse betonin osuus kuutiometrissä vähenee. Havaitun tiheydenmuutoksen perusteella voidaan laskea betonin laskennallinen ilmamäärä käyttäen kaavaa 11, mikäli oletetaan että betonin tiheys on muuttunut vain ilmamäärän muutoksen vuoksi (Punkki 2017). Todellisuudessa betonin koostumus vaihtelee tai tulokset vaihtelevat myös tiheyden mitaustavan aiheuttaman hajonnan vuoksi. Mittausvirheiden suuruusluokkaa on käsitelty luvussa 6.5.

$$Ilmamäärä_{\text{laskennallinen}} = \left( \frac{\rho_{\text{vertailutulos}}}{\rho_{\text{mitattu}}} \right) - 100 \% + Ilmamäärä_{\text{vertailutulos}} \quad (11)$$

Laskennallisen ilmamäärän ja mitatun ilmamäärän vertailu (kuvaaja 2) osoittaa, että konseptina laskennallinen arvio kuvaa järkevästi tiheyden ja ilmamäärän suhdetta, mutta menetelmän hajonta vaikuttaa suurelta. Tämän havainnon perusteella laskennallista ilmamäärää ei ole käytetty tämän tutkimusten muiden tulosten arvioinnin apuna.

**Kuvaaja 2 Betoniasemalla mitattu kuormakohtainen ilmamäärä**

Betoniasemalla tehtyt ilmamäärämittaukset (kuvaaja 1) seuraavat hyvin betonin suhteutuksen 4,0 % ilmamäärätavoitetta. Keskimääräinen ilmamäärä tehtaalta lähtevälle betonille oli koko aineistossa 3,75 %. Betoniaseman ilmamäärämittausten keskihajonnaksi muodostui 16mm raekoolla 0,34 % ja 32 mm raekoolla 0,25 %.

**Kuvaaja 3 Kuormien sekoitusaika on yksi annosraportteihin tallentuvista tiedoista**

Valmistuksessa noudatettiin hyvää huokostetun betonin valmistustapaa ja annosten sekoitusaika oli aina vähintään 120 sekuntia (kuva 21). Poikkeavat sekoitusajat koskivat yksittäisiä annoksia, eivätkä koko kuormaa. Todennäköisesti betonin valmistanutta prosessinhoitajaa työllistivät puhelinsoitot tai muut toimenpiteet, minkä vuoksi annoksen pudottamista betoniauton kyytiin täytyi käytännön syistä lykätä.

## 5.2 Työmaan tuoreen betonin laadunvalvonta

Työmaalla toimineet kaksi laboranttia kirjassivat mittauksissa taulukoiden 5.1 ja 5.2 mukaisia tuloksia (BA = Betoniasema, TM = Työmaa). Laadunvalvonta suoritettiin työmaalla kuorman purkamisen alettua noin 1/3 kohdalla ja pyrkien tilanteeseen, jossa 2/3 kuormasta oli purettu. Sama henkilö toisti tiheysmittauksen ja ilmamäärämittauksen aina kaksi kertaa (A&B). Mittaustuloksia A&B on käsitelty samanarvoisina ja niistä on esitetty keskiarvo.

**Taulukko 5.1 Työmaalla mitatut kuormakohtaiset tiheystulokset**

TYÖMAA (TM)				Teor.valmis- tustiheys (tot. annostelu)	Mitattu tiheys TM (A&B keskiarvo)	$\Delta\rho$ TM-A - TM-B	$\Delta\rho$ TM-teor	$\Delta\rho$ BA-TM
nro	kk-nro	m3	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	17952	8	16	2336	2373	-1	37	33
2	17953	8	16	2347	2358	52	-15	7
3	17954	8	16	2318	2352	21	23	-20
4	17955	12	16	2332	2331	29	-16	-28
5	17958	8	32	2347	2360	-3	15	-35
6	17959	8	32	2364	2370	2	5	10
7	17960	9	16	2364	2326	-3	-36	-32
8	17961	12	32	2373	2375	1	2	11
9	17963	8	32	2370	2345	1	-26	-26
10	17964	8	16	2358	2335	4	-25	-36
11	17965	9	32	2357	2355	3	-3	20
12	17966	12	32	2357	2336	-6	-18	-21
13	17967	8	16	2347	2328	3	-21	26
14	17970	12	32	2330	2361	9	27	31
15	17971	8	32	2355	2324	-4	-29	-21
16	17974	12	16	2327	2339	5	9	17
17	17975	8	32	2349	2366	33	1	16
18	17977	8	32	2351	2334	-1	-16	9
19	17978	8	32	2349	2340	4	-11	-25
20	17981	12	16	2323	-	-	-	-
21	17982	4	16	2354	-	-	-	-
#16			x	2341	2336	14	-5	-4
			s	16	17	19	26	28
			min	2318	2316	-3	-36	-36
			max	2364	2373	52	37	33
#32			x	2355	2350	3	-5	-3
			s	12	15	10	17	23
			min	2330	2326	-6	-29	-35
			max	2373	2375	33	27	31

Työmaan tiheydenmääritykset ovat keskenään yhdensuuntaiset ja eri betonikuormien tiheyden keskihajonta työmaamittauksissa on vain noin +/-15-20 kg/m<sup>3</sup> (taulukko 5.1). Keskimäärin kahden mittauksen erot ovat vähäiset, mutta useammin myöhemmin mitattu ja enemmän sekoitettu tulos B on matalampi. Tästä ei kuitenkaan voida tehdä johtopäätöksiä. Kahden mittauksen välillä tuloksissa esiintyy merkittävä vaihtelu kuormissa 2, 3, 4 ja 17, jonka ensisijaiseksi syyksi voidaan arvioida tiheysmittauksen tekemiseen liittyvä virhe esim. painemittariastian täyttämässä tai näytteen edustavuudessa ja tasalaatuisuudessa.

Työmaalla mitattujen tiheystulosten (taulukko 5.1), betoniaseman tiheystulosten ja teoreettisen tiheyden välillä vertailukelpoisuudessa vaikuttaa olevan ongelmia ja muutokset ovat osittain epäjohdonmukaisia, kun otetaan huomioon verrattain luotettava tieto ilmamäärän kehittymisestä kuljetuksen aikana (taulukko 5.2). Keskiarvona tiheys laskee betoniasemalta työmaalle, mutta yksittäisiä kuormatuloksia tarkasteltaessa tuloksissa on suurta satunnaisuutta, minkä vuoksi edes muutoksen suuntaa olisi vaikea arvioida pienellä otoksella. Todennäköinen selittäjä tuloksille on tiheyden mittaustavasta johtuvat useat virheet, jotka osittain kumoavat toisiaan. Inhimillinen tekijä korostu tiheysmittauksissa mm. tiivistyksen ja astian täytön osalta.

**Taulukko 5.2 Työmaalla mitatut kuormakohtaiset ilmamäärätulokset**

TYÖMAA (TM)				Mitattu ilmam. TM (A&B keskiarvo)	$\Delta$ TM-A - TM-B	Betoniasema- malla (BA) mitattu ilmamäärä	$\Delta$ BA -> TM
nro	kk-nro	m3	#	[%]	[%]	[%]	[%]
1	17952	8	16	5,2	0,1	4,0	+1,2
2	17953	8	16	5,2	0,2	4,6	+0,6
3	17954	8	16	5,2	0,4	3,9	+1,3
4	17955	12	16	5,2	0,0	3,6	+1,6
5	17958	8	32	5,3	-0,2	3,5	+1,8
6	17959	8	32	5,0	-0,2	3,3	+1,7
7	17960	9	16	5,5	-0,4	3,5	+2,0
8	17961	12	32	4,9	-0,2	3,8	+1,1
9	17963	8	32	5,4	0,1	3,8	+1,6
10	17964	8	16	5,3	0,0	3,5	+1,8
11	17965	9	32	4,9	0,2	3,3	+1,6
12	17966	12	32	4,9	0,1	3,5	+1,4
13	17967	8	16	5,3	-0,1	3,7	+1,6
14	17970	12	32	4,8	-0,3	4,0	+0,8
15	17971	8	32	5,2	0,3	3,5	+1,7
16	17974	12	16	5,1	-0,3	4,2	+0,9
17	17975	8	32	5,2	-0,3	3,6	+1,6
18	17977	8	32	4,6	-0,1	3,8	+0,8
19	17978	8	32	4,9	-0,2	4,0	+0,9
20	17981	12	16	-	-	3,9	-
21	17982	4	16	-	-	3,7	-
#16			x	5,2	0,0	3,9	1,4
			s	0,1	0,3	0,3	0,5
			min	5,1	-0,4	3,5	0,6
			max	5,5	0,4	4,6	2,0
#32			x	5,0	-0,1	3,6	1,3
			s	0,2	0,2	0,3	0,4
			min	4,6	-0,3	3,3	0,8
			max	5,4	0,3	4,0	1,8

Työmaalle toimitetun betonin ilmamäärä oli tulosten perusteella hyvin tasalaatuinen noin 5,0 %, johon syntyi nousua kuljetuksen aikana betonitehtaalta työmaalle keskimäärin 1,35 %. Tulokset ovat ilmamäärän kehittymisen osalta johdonmukaiset (taulukko 5.2). Työmaalla tehtyjen kahden ilmamäärä mittauksen välillä ei havaittu merkittävää eroa. Joka toisen B-mittauksen tulos on suurempi ja joka toinen jää matalammaksi.

### 5.3 Laadunvalvonnan normikoeappaleet

Tutkimuksessa valmistettiin normaalin laadunvalvonnan koeappaleita tihennetyllä menetelmällä kahdessa paikassa 1) betoniasemalla jokaisesta valmistetusta betonikuormasta ja 2) työmaalla yhteensä 12 eri betonikuormasta. Kaikki koeappaleet puristettiin 28 vrk ikäisinä 18.1.2018. Lieriökoekappaleiden puristuslujuudet on muutettu RakMK B4:n mukaisesti särmältään 150mm kuutiokoekappaleen K-puristuslujuudeksi.

Taulukko 6 Valmistettujen laadunvalvontakoeappaleiden tulokset

NORMIKOEKAPPALEET				(C) Betoniasemakoeappaleet Ruskon Betoni, Tuusula		(D) Työmaakoeappaleet VTT Otaniemi		Δ K (C-D)	Δ ρ (C-D)
nro	kk-nro	m <sup>3</sup>	#	Lujuus [K]	Tiheys ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Lujuus [Mpa]	Tiheys ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	[Mpa]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	17952	8	16	54,1	2396	65,3	2430	-11,2	-34
2	17953	8	16	52,9	2413	-	-		
3	17954	8	16	52,4	2429	60,7	2400	-8,3	29
4	17955	12	16	43,5	2413	-	-		
5	17958	8	32	56,2	2454	-	-		
6	17959	8	32	55,4	2431	56,0	2410	-0,6	21
7	17960	9	16	58,0	2431	59,1	2380	-1,1	51
8	17961	12	32	57,4	2423	57,9	2390	-0,5	33
9	17963	8	32	61,3	2428	56,6	2400	4,7	28
10	17964	8	16	57,8	2419	-	-		
11	17965	9	32	56,7	2427	-	-		
12	17966	12	32	56,2	2414	57,6	2360	-1,4	54
13	17967	8	16	58,3	2424	59,3	2400	-1,0	24
14	17970	12	32	57,1	2413	-	-		
15	17971	8	32	54,5	2402	66,4	2430	-11,9	-28
16	17974	12	16	54,8	2402	-	-		
17	17975	8	32	52,3	2404	-	-		
18	17977	8	32	55,3	2422	58,9	2410	-3,6	12
19	17978	8	32	58,4	2427	56,6	2320	1,8	107
20	17981	12	16	57,1	2403	60,0	2380	-2,9	23
21	17982	4	16	57,8	2397	65,3	2430		
#16			x	54,7	2413	60,9	2398	-4,9	18,6
			s	4,5	13	2,6	20	4,6	31,5
			min	43,5	2396	59,1	2380	-11,2	-34
			max	58,3	2431	65,3	2430	-1,0	51
#32			x	56,4	2422	58,6	2389	-1,6	32,4
			s	2,3	14,4	3,6	37	5,2	41,3
			min	52,3	2402	56,0	2320	-11,9	-28
			max	61,3	2454	66,4	2430	4,7	107

Työmaakoeappaleiden puristuslujuustulos on keskimäärin noin 3 MPa korkeampi kuin betoniaseman koeappaleilla. Erilaiset puristuslaitteet sekä tasoitustapa ovat todennäköiset selittäjät taulukossa 6 esitetyille tuloksille. Lisäksi tuloksiin voi vaikuttaa kappaleiden mahdollisesti eroava tiivistys, mikä tuo eroa ilmamäärään ja huokoisuuteen, joka vaikuttaa kappaleen lujuuteen. Tiheystulokset ovat tässä suhteessa kuitenkin betoniasemakoeappaleiden puolella, vaikka niiden lujuus jää alhaisemmaksi.

Työmaakappaleiden puristuspinnat tasoitettiin rikkilaastilla ja betoniaseman koekappaleet hiomalla. Molemmilla tavoilla puristuspinta saattaa jäädä vinoksi siten, että se vaikuttaa kappaleen jännitys jakaumaan ja murtumiseen. Normaalilujuuksisilla betoneilla tasoitusmenetelmän vaikutusta keskimääräisiin puristuslujuuksiin ei ole luotettavasti havaittu, mutta tutkittaessa korkealujuusbetoneita (80-100 Mpa+) on suurimmillaan todettu noin 5 % etu hionnan hyväksi (Dumitru et al. 2016). Toisaalta kokemusperäiset tulokset puhuvat rikityksen tuottamista 1-3 MPa paremmista tuloksista normaalilujuuksisilla betoneilla. Rikittämällä puristuspinnan voidaan ajatella jäävän tasalaatuisemmaksi kuin hiomalla, jossa huokosia jää myös puristuspintaan (haastattelu Anttila, 26.11.2018). Systemaattinen vaikutus tässä tutkimuksessa voidaan arvioida vähäiseksi.

Työmaakoekappaleiden sarja on vajaa, mutta vain 2/12 tapauksessa betoniaseman kappaleen tulos samasta betonista on korkeampi. Kuorman 17955 osalta puristuslujuustuloksissa on yksittäinen alitus ja kuormissa 17952, 17954 sekä 17971 osalta merkittävä ero, mikä heikentää keskiarvoja.

Yksittäistä puristustulosta 17955/C voidaan pitää epäonnistuneena, vaikka esimerkiksi murtotapahtumaa ei enää jälkikäteen voida selvittää. Poikkeava tulosta ei hylätty, vaikka tälle olisi ollut myös perusteita ja vaikutus tilastollisiin tunnuslukuihin on tässä tapauksessa merkittävä. Syitä alitustulokseen voi olla useita: esimerkiksi erottuminen koekappaleen pinnassa, vaurio koekappaleessa tai puristuslaitteen murrontunnistuksen virhe.



## 5.4 Valmiista rakenteesta poratut rakennekoekappaleet

### 5.4.1 Rakennekoekappaleiden puristuslujuus

Rakenteesta porattujen koekappaleiden puristuslujuudet määritettiin standardin ”SFS-EN 12390-3 kovettuneen betonin testaus” -mukaisesti ja aiemmin kappaleessa 4 esitetyllä tavalla. Puristushetkellä kappaleiden ikä oli 49 vrk valusta, minkä lämpötilaolosuhteiden perusteella voitiin arvioida vastaavan 28d kypsyyssikää normiolosuhteissa (luku 4.3). Kappale D5AK jouduttiin porakappaleen katkeamisen vuoksi muodostamaan muista eriävästä kohdasta lähempänä laatan keskikohtaa, mutta sen koko ja muut ominaisuudet olivat muuten vertailukelpoiset. Yksityiskohtaiset tulokset on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 7 Kansirakenteesta porattujen koekappaleiden puristuslujuustulokset

RAKENNEKOEKAPPALEET				Koekappaletunnus	Lujuus K [Mpa]	$\Delta K$ alapinta - yläpinta	
nro	kk-nro	m3	#			[Mpa]	[%]
13	17967	8	16	A4A	53,5	7,5	14,0
				A4Y	46,0		
14	17970	12	32	A1A	52,4	3,4	6,5
				A1Y	49,0		
14	17970	12	32	A3A	51,3	1,9	3,7
				A3Y	49,4		
16	17974	12	16	B1A	49,4	2,1	4,3
				B1Y	47,3		
16	17974	12	16	B2A	52,9	-1,2	-2,3
				B2Y	54,1		
16	17974	12	16	B3A	54,4	2,2	4,0
				B3Y	52,2		
16	17974	12	16	B4A	50,9	3,9	7,7
				B4Y	47,0		
16	17974	12	16	B5A	51,9	0,8	1,5
				B5Y	51,1		
18	17977	8	32	C1A	53,4	2,4	4,5
				C1Y	51,0		
18	17977	8	32	C2A	53,0	-2,5	-4,7
				C2Y	55,5		
18	17977	8	32	C3A	49,7	-0,5	-1,0
				C3Y	50,2		
18	17977	8	32	C4A	52,1	-0,5	-1,0
				C4Y	52,6		
18	17977	8	32	C5A	53,3	0,0	0,0
				C5Y	53,3		
20	17981	12	16	D1A	46,0	-0,4	-0,9
				D1Y	46,4		
20	17981	12	16	D2A	46,2	-2,7	-5,8
				D2Y	48,9		
20	17981	12	16	D3A	52,3	6,7	12,8
				D3Y	45,6		
20	17981	12	16	D4A	47,8	-1,9	-4,0
				D4Y	49,7		
20	17981	12	16	D5AK	45,0	5,0	11,1
				D5Y	39,6		
			x		50,1	1,5	2,8
			s		3,4	3,0	5,9
			min		39,6	-2,7	-5,8
			max		55,5	7,5	14,0

Valmiin rakenteen porakappaleiden puristuslujuustuloksissa saavutettiin odotuksia tasaisempia lujuuksia (taulukko 7). Yksittäisen kappaleen D5Y tulos poikkesi merkittävästi (5 MPa) keskiarvon alapuolelle ja useampi tulos vastaavan verran (5 MPa) keskiarvon yläpuolelle. Keskimäärin valmiin rakenteen puristuslujuus saavutti 83 % (50/60 MPa) työmaakoekappaleesta ja 90 % (55/60 MPa) verrattuna betoniaseman puristuslujuuskappaleeseen. Ylä- ja alapintojen tulosten eroavaisuuksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 6.8.

#### 5.4.2 Rakennekoekappaleiden ilmamäärä

Valmiista rakenteesta porattujen koekappaleiden ylä- ja alapinnat käytettiin puristuslujuuden arviointiin ja keskiosasta valmistettiin 60 mm ilmamääräkappale, jolle määritettiin ilmamäärä luvussa 4.2.6. esiteltyllä painekyllästysmenetelmällä. Menetelmällä saavutettu ilmamäärätulos (taulukot 8 & 9) ei ole täysin sama asia kuin ilmamäärämittarilla mitattu ilmamäärä, mutta tarjoaa hyvän vertailuarvon betonin huokoisuuden kehittymisestä työmaalla. Painekyllästysmenetelmän kuivatus saattaa myös vaikuttaa betonin mikrorakenteeseen.

**Taulukko 8 Painekyllästyskokeella määritetyt ilmamäärät #16 maksiraekoko**

A4	B1	B2	B3	B4	B5	D1	D2	D3	D4	D5
7,8	6,4	5,7	6,5	5,8	5,8	8,8	6,4	6,5	6,2	5,7

$$x_{ilmamäärä.rakenne\#16} = 6,5 \%$$

**Taulukko 9 Painekyllästyskokeella määritetyt ilmamäärät #32 maksiraekoko**

A1	A3	C1	C2	C3	C4	C5
6,2	5,7	6,2	6,7	4,1	5,8	4,7

$$x_{ilmamäärä.rakenne\#32} = 5,6 \%$$

Saaduissa ilmamäärätuloksissa (taulukot 8 & 9) esiintyy huomattavasti enemmän vaihtelua kuin työmaamittauksissa (taulukko 5.2), mitä selittävät erilainen mittausten menetelmä sekä todellisessa rakenteessa vaihtelevasti toteutuva betonin tiivistyminen. Tuloksia voidaan pitää onnistuneina ja uskottavina, huomioiden vertailukelpoisuuden rajoitukset. Kun kaikki ilmamäärätulokset poranäytteistä vedetään yhteen, saadaan parhaaksi arvioksi rakenteen ilmamäärästä 6,2 %. Tätä voidaan pitää erinomaisena tuloksena (kappale 3.4), mikä täyttää myös P-lukubetonin ilmamäärävaatimukset (kappale 3.6).

$$x_{ilmamäärä.rakenne.yhdistetty} = 6,2 \%$$

$$s_{ilmamäärä.rakenne.yhdistetty} = \pm 1,0 \%$$

Mikäli aineistosta poistetaan vielä kaksi suurinta ja pienintä arvoa, ilmamäärän keskihajonta laskee esitetyistä tuloksista oleellisesti ja tällöin ilmamäärän hajonta on vain  $\pm 0,4 \%$ .

### 5.4.3 Rakennekoekappaleiden tiheys

Taulukko 10 Rakennekoekappaleista määritetyt tiheydet

RAKENNEKOEKAPPALEET				Tunnus	PK Pintakuiva tiheys (puristus- kokeen yhteydessä, mitoista)	PK Kapilaari- sesti kyllästetty tiheys (puristus- kokeen yhteydessä, mitoista)	Tunnus	PA Kapilaari- sesti kylläs- tetty tiheys (paine-työstysko- keen yhteydessä)
nro	kk-nro	m3	#		[kg/m3]	[kg/m3]		[kg/m3]
13	17967	8	16	A4A	2251	2266	A4K	2260
				A4Y	2217	2235		
14	17970	12	32	A1A	2265	-	A1K	2315
				A1Y	2230	-		
14	17970	12	32	A3A	2256	2273	A3K	2332
				A3Y	2243	2261		
16	17974	12	16	B1A	2292	2307	B1K	2298
				B1Y	2261	2279		
16	17974	12	16	B2A	2288	-	B2K	2329
				B2Y	2289	-		
16	17974	12	16	B3A	2317	2332	B3K	2292
				B3Y	2264	2280		
16	17974	12	16	B4A	2289	2303	B4K	2318
				B4Y	2298	2313		
16	17974	12	16	B5A	2265	2280	B5K	2313
				B5Y	2316	2332		
18	17977	8	32	C1A	2302	2316	C1K	2325
				C1Y	2273	2290		
18	17977	8	32	C2A	2278	2291	C2K	2277
				C2Y	2241	2257		
18	17977	8	32	C3A	2282	2297	C3K	2309
				C3Y	2228	2243		
18	17977	8	32	C4A	2276	-	C4K	2332
				C4Y	2292	-		
18	17977	8	32	C5A	2310	2325	C5K	2316
				C5Y	2224	2243		
20	17981	12	16	D1A	2268	2285	D1K	2229
				D1Y	2196	2214		
20	17981	12	16	D2A	2184	2203	D2K	2289
				D2Y	2224	2243		
20	17981	12	16	D3A	2292	2309	D3K	2293
				D3Y	2170	2191		
20	17981	12	16	D4A	2220	2238	D4K	2295
				D4Y	2200	2218		
20	17981	12	16	D5AK	2205	2226	D5K	2356
				D5Y	2155	2178		
			x		2255	2267		2304
			s		42	42		30
			min		2155	2178		2229
			max		2317	2332		2355

Taulukossa 10 on esitetty porakoe-kappaleista eri vaiheissa määritetyt tiheydet. Kyllästetty tiheys (PK) on puristuskappaleesta mitatuista mitoista vesisäilytyksen jälkeen punnitsemalla määritetty tiheys. Pintakuiva tiheys (PK) on puristuskappaleen mitatuista mitoista puristus-hetkellä punnitsemalla määritetty tiheys. Vertailutiheytenä on painekyllästyskokeen yhteydessä porakoe-kappaleen keskiosasta määritetty tiheys kapilaarisesti kyllästyneenä (PA), missä määrittäminen perustuu Arkhimedeeseen lakiin.

Saadut tulokset (taulukko 10) antavat aiheen epäillä, että pienten porakappaleiden tiheystulokset olisivat systemaattisesti matalampia mitoista määritettynä kuin vedessä ja ilmassa punnitsemalla. Kuten voidaan olettaa, mitoista mittaaminen tuottaa suuremman otoksen sisäisen hajonnan. Kun kuitenkin huomioidaan aiemmin suurilla normilieriökoekappaleiden mitatuista mitoista saadut tulokset (taulukko 6), epäily on ristiriitainen. Lieriöt tuottivat valmistusketjussa tuoreen betonin määritystä merkittävästi suurempia tuloksia, mihin ei löytynyt yhtä selkeää selittäjää. Perustelluin tekijä on betonin tiivistyksen laatu työmaalla.

Kappaleiden PK & PA voidaan arvioida olleen vastaavassa kosteustilassa. Aiheeseen liittyy paljon epävarmuustekijöitä, betoninäyte ei ole täysin vertailukelpoinen ja mittaukset suoritettiin eri aikaan. Mitattuja mittoja käytettäessä koesarjassa oli enemmän keskinäistä hajontaa, mikä on tuloksena odotettu, kun ymmärretään mittaamiseen liittyvät inhimilliset ja mittatarkkuudesta johtuvat virheet.

Kokonaisuutena voidaan arvioida, että tiheyden tulosten hyödyntäminen on haastavaa ja määrittämenetelmien vertailukelpoisuutta olisi aiheellista tutkia tarkemmin laboratorio-olosuhteissa.

#### **5.4.4 Rakennekoekappaleiden raudoitusterästen huomioiminen**

Osa rakennekoekappaleista osui ennakoivista toimenpiteistä huolimatta porattaessa rakenteen raudoitukseen. Tutkimuksen luonne huomioden ei ollut perusteltua hylätä terästä sisältäneitä kappaleita, vaan niiden tuloksia käytettiin hyödyksi soveltaen. Raudoitusteräksenä oli käytetty kuumavalssattua harjaterästankoa A500HW, jonka tiheydeksi arvioitiin kirjallisuuden perusteella 7850 kg/m<sup>3</sup>. Terästä sisältäneet kappaleet ja terästen sijainti dokumentoitiin.

Terästen vaikutus puristuskappaleista määritettyyn tiheyteen pyrittiin korjaamaan punnitsemalla teräkset. Terästä sisältäneet poranäytteet murskattiin puristuskokeen jälkeen leuka-murskaimella ja puhdistetun teräskappaleen massa määritettiin Mettler Toledo MS6002TS/00 -vaalla. Teräksen tiheyden ja massan perusteella voitiin määrittää teräksen tilavuus. Terästä vastaava tilavuusosuus korvattiin muuta näytettä vastaavalla betonin tiheydellä Excel-tarkastelussa.

## 6 Tulosten arviointi

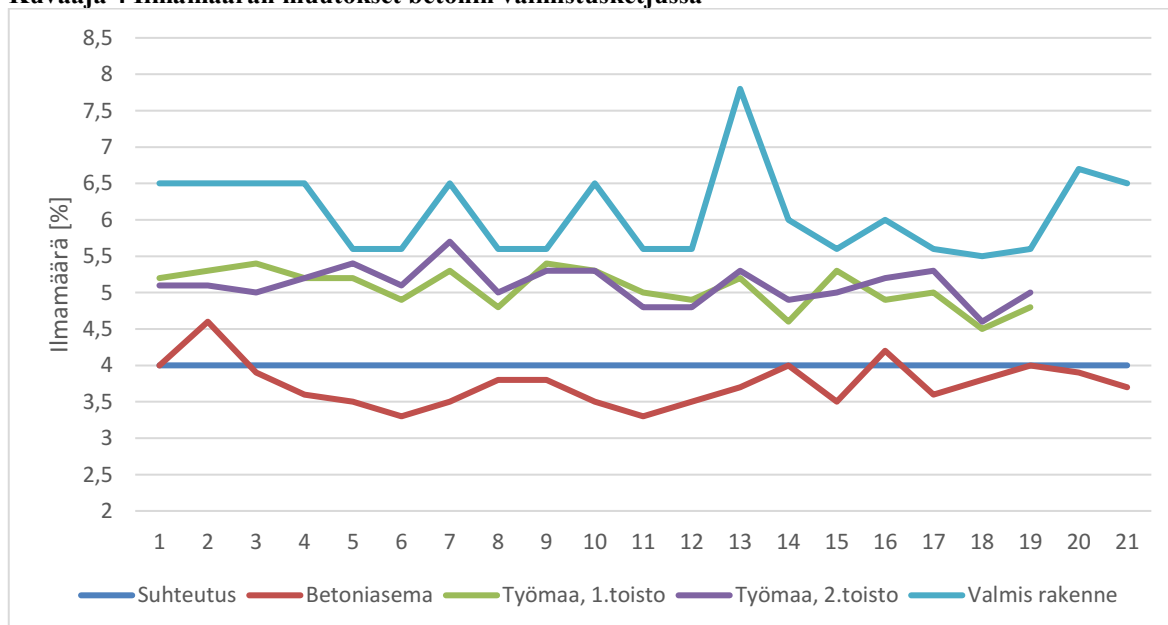
Tutkimuksessa seuratuista 21 betonikuormasta kuusi (17966, 17967, 17970, 17974, 17977, 17981) valettiin rakenteen laatta-alueille, jonne mahdolliset porauspisteet oli valmisteltu. A-sektorilla kahden porauspisteen (A2, A5) näytteenottoa ei pystytty työmaateknisistä syistä toteuttamaan. Tässä kappaleessa on seurattu muutoksia valmistusprosessissa erityisesti kolmen kuorman (17967, 17977, 17981) osalta, joista on käytettävissä useita poranäytteitä ja tuloksia kaikista valmistusprosessin kolmesta eri vaiheesta.

Kaikki kokeellisen tieteen mittaustulokset sisältävät mittausrvirhettä ja mittaustulos on vain arvio mitattavasta suureesta. Koejärjestelyssä on pyritty poistamaan selkeät systemaattiset virheet määritetyn mittaustavan ja tulosten korjausten avulla. Tuloksien luotettavuuteen tuovat epävarmuutta muuttavat puuttuvat mittaustulokset ja toiminen tutkimusolosuhteiden sijaan työmaalla. Mittausten toistoissa mahdollisesti muuttuvia tekijöitä on paljon, eikä täysin voida varmistua mikä osa tuloksissa esiintyvistä vaihtelusta kulloinkin johtuu tarkasteltavasta asiasta. Tässä tutkimuksessa saatuja tulokset soveltuvat parhaiten ilmiöiden todentamiseen ja suuruusluokkien arviointiin.

### 6.1 Ilmamäärän muutokset valmistusketjussa

Tutkimuksessa tarkasteltujen betonikuormien ilmamäärä nousi kuljetettaessa betoniase-malta työmaalle keskimäärin 1,35 % (kuvaaja 4 & kappale 5.2 & taulukko 6.2). Tulosta voidaan pitää kuvaavana, vaikka tutkimuskohteessa kuljetusmatka ja -aika oli tavanomaista lyhyempi. Koska betonia ei sekoiteta tavallisesti kuljetuksen aikana, betonia sekoitettiin kohtuullisella tarkkuudella sama aika kuin pidemmälläkin kuljetusmatkalla. Tällöin avoimeksi jää lähinnä kuljetusajan vaikutus betonin. Työmaatoimintojen vaikutukset prosessiin ovat tyypillisellä tavalla mukana tuloksissa.

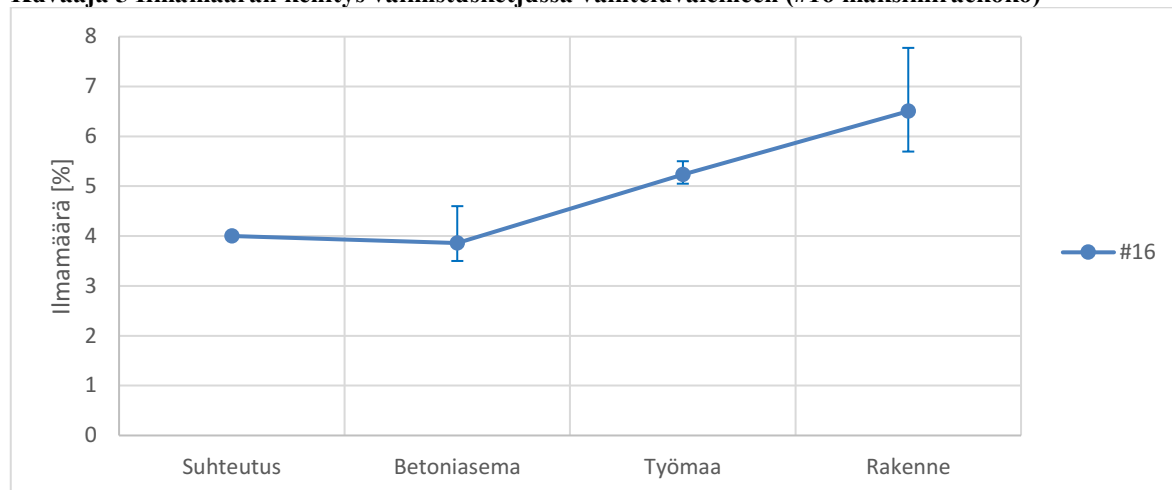
Kuvaaja 4 Ilmamäärän muutokset betonin valmistusketjussa



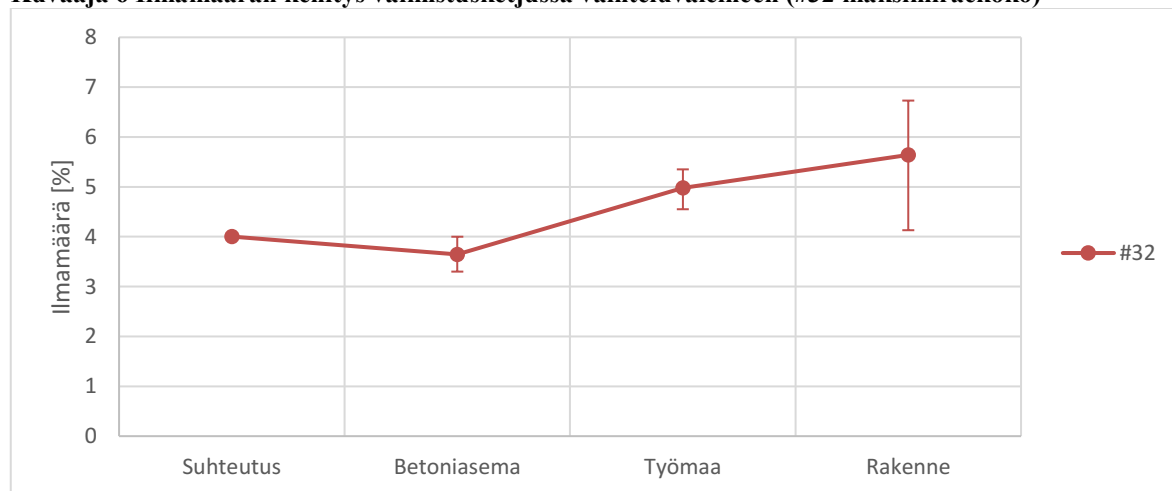
Kuvaajassa 4 valmiin rakenteen ilmamääränä on käytetty painekyllästyskokeella määritettyjä ilmamäärätuloksia sekä niiden perustella #16 ja #32 -raekoon betonille määritettyjä keskimääräisiä ilmamääriä niiden kuormien kohdalla, joista ei ole tuloksia.

Betonin valmistaja tunsi hyvin käyttämiensä huokostimen ja muiden lisäaineiden yhteisvaikutuksen, sillä betoniasemalla suhteutuksessa tavoiteltu ilmamäärä vastasi hyvin mitattua ilmamäärää betoniasemalla (kuvaaja 4). Työmaalla kahden ilmamäärämittauksen toisto tuotti luotettavia ja vertailukelpoisia tuloksia. Näyte otettiin kahdesti kustakin betoniautosta, joten betonia sekoitettiin purettaessa mittausten välissä työmaalla. Tällä ei kuitenkaan ollut systemaattista vaikutusta, vaan suuruusjärjestys vaihteli satunnaisesti molemmiin puolin.

**Kuvaaja 5 Ilmamäärän kehitys valmistusketjussa vaihteluväleineen (#16 maksimiraekoko)**



**Kuvaaja 6 Ilmamäärän kehitys valmistusketjussa vaihteluväleineen (#32 maksimiraekoko)**

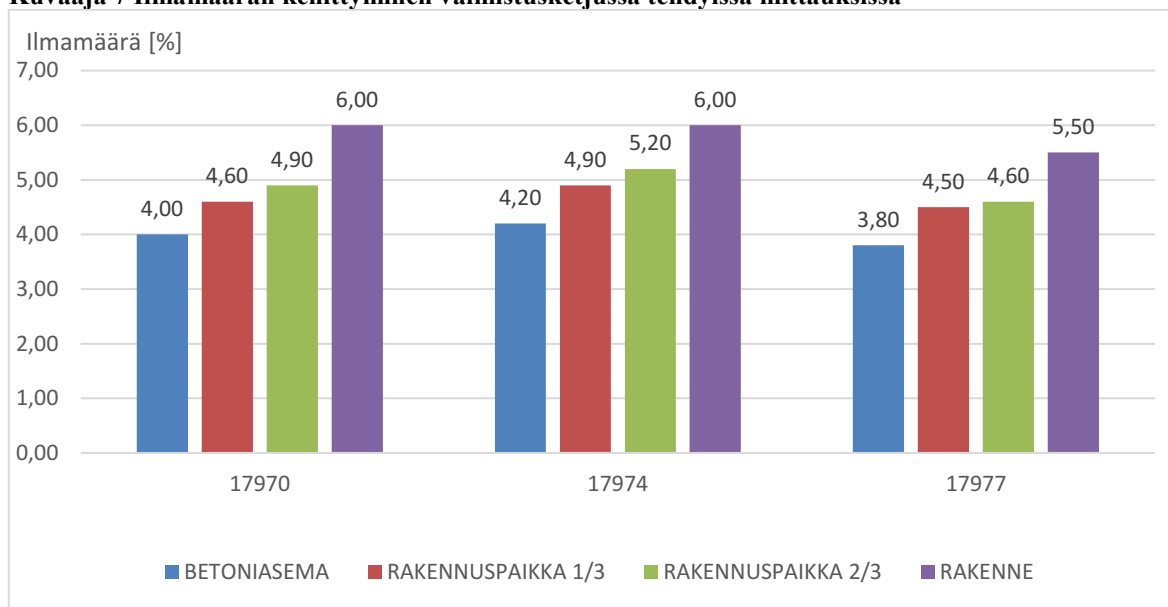


Betonin ilmamäärä kohosi tutkimuksen perusteella työmaan ilmamäärämittauksen jälkeen valmiiseen rakenteeseen keskimäärin 1,0 %. Vaihteluvälikuvaajissa (kuvaajat 5 & 6) on esitetty graafisesti keskiarvo ja pienin sekä suurin arvo kussakin valmistusketjun pisteessä.

Kolme ensimmäistä mittaustulosta on tehty vertailukelpoisesti, mutta painekyllästyksellä määritetty ilmamäärä ei tarkalleen ottaen ole sama suure ja kuvaa täysin samoja huokoisia kuin ilmamäärämittauksen tulos. Valmiin rakenteen ilmamäärätuloksissa esiintyy merkittävästi laajempaa vaihtelua kuin aiemmin valmistusketjussa, mitä selittävät mittausmenetelmä ja työmaalla todellisuudessa vaihtelevasti toteutuva betonin tiivistys.

**Taulukko 11 Esimerkki kolmen betonierän ilmamäärätuloksista valmistusketjussa**

kk-nro	Betoniaseman ilmamäärämittaus	Työmaan ilmamäärämittaus	Rakennekoekappale ilmamäärämääritys
17970	4,00 %	4,8 % (2 kpl ka.)	6,0 % (2 kpl ka.)
17974	4,20 %	5,1 % (2 kpl ka.)	6,0 % (10 kpl ka.)
17977	3,80 %	4,6 % (2 kpl ka.)	5,5 % (10 kpl ka.)

**Kuvaaja 7 Ilmamäärän kehittyminen valmistusketjussa tehdyissä mittauksissa**

Tarkasteltaessa esimerkiseurantakuormia 17970, 18974 ja 17977 (taulukko 11) ilmamäärän muutokset ovat systemaattisia ja kohoavat betoniaseman ja työmaan välillä 0,6-1,0 %. Ilmamäärä sattuu kasvamaan myös kaikissa tapauksissa kahden ilmamäärämittauksen välillä. Kahden työmaatoistomittauksen välillä tämä ei kuitenkaan vaikuta kokonaistulosten perusteella olevan oikea havainto (taulukko 5.2), sillä tuloksia on tasaisesti positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan. Valmiista rakenteesta määritetty ilmamäärä nousee edelleen 0,9-1,2 % työmaamittausta korkeammaksi.

Kirjallisuudessa ilmamäärän kehittymistä työmaalla koskevat tulokset ovat moninaisia, mitä selittävät mm. vaihtelevat olosuhteet ja betonin osa-aineet. Eräässä työmaatutkimuksessa pumppaus kasvatti betonin ilmamäärää keskimäärin 1,5 %. Samassa yhteydessä tehdyssä laajassa laboratoriotutkimuksessa betonin ilmamäärä kuitenkin laski pumpattaessa. Yhdeksi keskeiseksi tekijäksi muutoksissa on esitetty betonin putoamista korkealta ja kovalla vauhdilla raudoitukseen ja muottiin, mikä mahdollistaa uuden ilman kaappautumisen betoniin samalla tavalla kuin betonin sekoituksessa valmistuksessa. Kansainvälisesti useat tehdyt tutkimukset päätyvät tulokseen, että betonin ilmamäärää menetetään pumppauksen aikana. (Vosahlik, J. 2018), mitä todennäköisesti selittää Suomessa yleisesti käytössä olevien lisäaineiden erilainen toiminta. Eräässä suomalaisessa tutkimuksessa myös normaalin rakennebetonin ilmamäärä kasvoi pumppauksessa poikkeuksetta ja keskimäärin 0,2 % (Pahkasalo 2018).

Kuten kappaleessa 5.4.2 todettiin, rakenteen toteutuneita ilmamäärätuloksia voidaan pitää erinomaisina ja 6,2 % parhaan arviona rakenteen keskimääräisestä ilmamäärästä, mikä täyttää myös P 30-betonin ilmamäärävaatimukset.

## 6.2 Puristuslujuuden muutokset valmistusketjussa

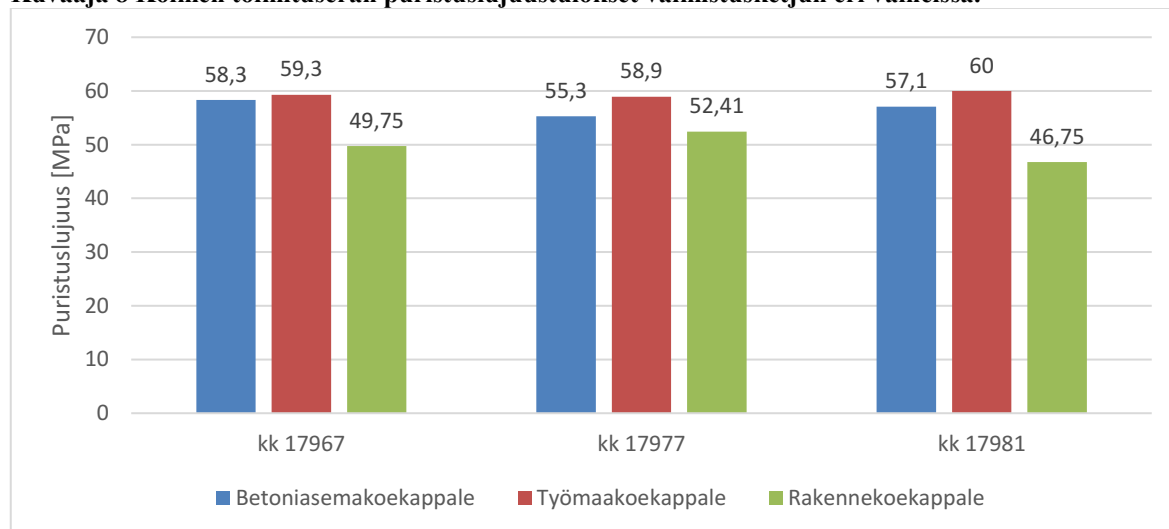
Taulukko 12 Esimerkki kolmen betonierän puristuslujuustuloksista valmistusketjussa

kk-nro	Betoniaseman koekappale 28d	Työmaakoekappale 28d	Rakennekoekappale 28d-kypsyys (49d)
17967	58,30	59,30	49,75 (2 kpl)
17977	55,30	58,90	52,41 (10 kpl)
17981	57,10	60,00	46,75 (10 kpl)

Taulukossa 12 esitetyistä puristuslujuustuloksista voidaan arvioida, ettei valmistuksen ja työmaan välillä ole tapahtunut lujuuden kannalta merkittävää muutosta betonimassan koostumuksessa. Betonin ilmamäärän tiedetään kuitenkin kohonneen kuljetuksen aikana (kohta 6.1), minkä tulisi johtaa puristuslujuuden laskuun. Betonin ilmamäärän kohoaminen 1% tavallisesti laskee betonin lujuutta n. 5 % (Neville 1995).

Koekappaleet on puristettu samana päivänä valmistuksesta ja niiden jälkihoitotapa on ollut vastaava. Puristuskokeen valmisteluissa kahden eri puristuspaikan välillä on kuitenkin käytetty kahta eriävää menetelmää. Ennen puristamista betoniaseman kappaleet on hiottu suoraksi ja työmaakoekappaleet on suoristettu rikkilaastilla.

Kuvaaja 8 Kolmen toimituserän puristuslujuustulokset valmistusketjun eri vaiheissa.

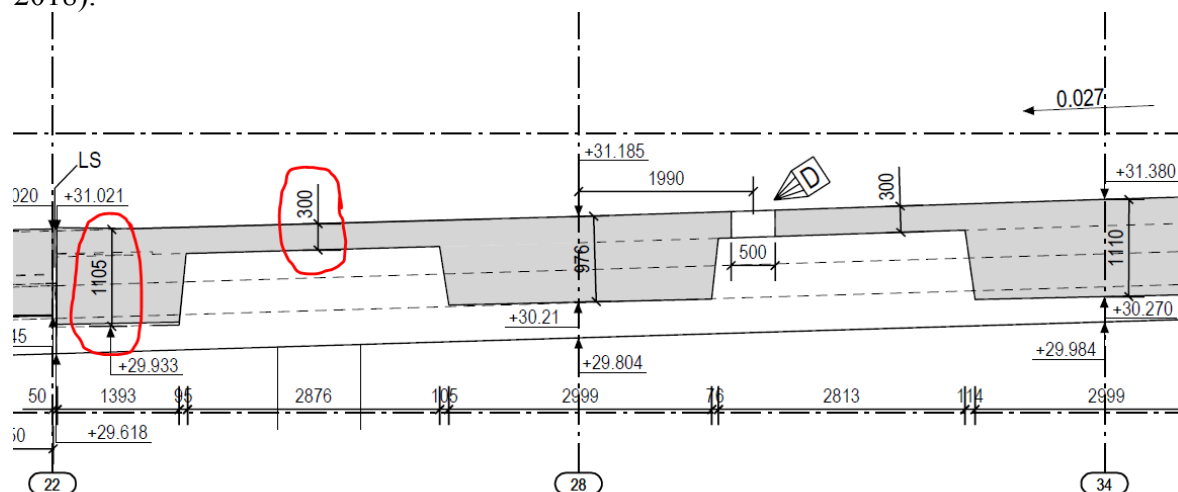


Betoniaseman ja työmaankoekappaleita kuvaa yksittäinen koekappale ja puristuslujuustulos kuormaa kohden. Rakennekoekappaleen puristuslujuus on keskiarvo kaikkien kuormasta tehtyjen porakoekappaleiden puristuslujuustuloksista (kuvaaja 8). Haastavien talviolosuhteiden vuoksi puristuskappaleiden todellisesta kypsyysistä ei voida täysin varmistua.

Puristuslujuuden kehittyminen valmistusketjussa vaikuttaa odotettavalta ja tulos vaikuttaa vastaavan viitetuloksia työmaaolosuhteissa valmistettujen ja normikoekappaleiden välillä tehdyissä tutkimuksissa. Esimerkiksi Haaviston ja Laaksosen selvityksessä (2018) työmaa-



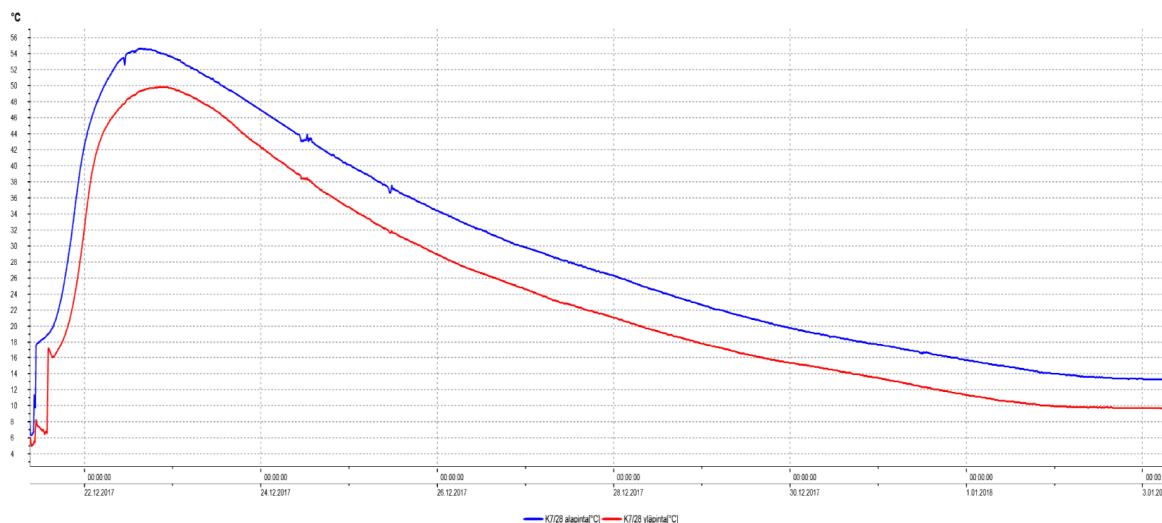
olosuhteita tutkittaessa porakappale saavutti tyypillisesti 88 % normikoekappaleen tuloksesta. Laatasta porattujen kappaleiden keskiarvo oli 78%. Eräässä toisessa tutkimuksessa vastaavuus oli 77 % ja koon aiemmista tutkimuksista 67-94 % (Haavisto & Laaksonen 2018).



**Kuva 28 Rakenteen betonointityö oli työmaalla suunniteltava massiivisten poikkileikkausten mukaan**

Työmaalla betonointityö ja betoniasemalla käytetty betonin suhteutus oli suunniteltu ensisijaisesti rakenteen kriittisten massiivisten palkkien ja alkavien talviolosuhteiden perusteella. Valmistuksessa käytettiin lämmitettyä vettä kuitenkin vain siten, että betonin lämpötila sekoituksen jälkeen oli 15-16 °C. Betonin lämpötila oli siis mahdollisimman matala normaalin lämmönkehityksen aikaansaamiseksi. Tavoitelämpötilana pidetään tavallisesti 20 °C ja talvibetonoinnissa voidaan käyttää korkeampia lähtölämpötiloja 25 °C tai 30 °C.

Betonivalmistaja oli teettänyt reseptistä ennakkolaskelman yleisesti liian korkeana pidetyn 60 °C raja-arvon (BY 2018) alittamiseksi. Käytetyillä järjestelyillä betonin lämpötila nousikin palkkiin sijoitetussa mittauspisteessä 54,60 °C ja lämpötilaero pahimmillaan 10-12 °C (kuva 22). Myös rakenteen jälkilämmitys järjestettiin siten, että palkkien lämpötilaolosuhteet pysyivät hallittuina ja jälkijännittämisen vaatimasta lujuudenkehityksestä saatiin hyvä varmuus. Palkin lujuudenkehityksen kannalta lämpötilaolosuhteet olivat hyvät.



## Kuva 29 Massiivipalkin K7/28 lämpötilankehitys

Tässä tutkimuksessa tarkasteltu rakenteena hoikemman ja nopeammin jäähtyvän laattaosuu-  
den (kuva 22) lujuudenkehitys tapahtui kokonaisuutena 20-25 °C palkkirakennetta alem-  
missa lämpötiloissa (kuva 29), mikä todennäköisesti lisää kypsyysikäarvioiden epävar-  
muutta.

Aiemmin taulukossa 3 esitetyn kypsyysikätulosten osalta Sandgrove-arvion perusteella po-  
rakoekappaleen lujuudenkehitysaika oli tutkimuksessa vallinneissa olosuhteissa noin 4 vrk  
vajaa. Samalla esimerkiksi kuorman 17967 rakennekoekappaleen puristuskoetulos oli 85 %  
betoniaseman ja työmaakoekappaleen puristustuloksen keskiarvosta.

On mahdollista, että betonin kypsyysikä ei rakennekappaleiden puristushetkellä ollut vertai-  
luelpoinen. Vaikutusta ei kuitenkaan voi arvioida, koska kypsyysikää varten olisi tullut laa-  
tia vertailukappaleita, jotka olisi puristettu eri ajankohtina. Tämä olisi kypsyysikäarvion luo-  
tettavuuden osalta ollut mielenkiintoista, mutta todennäköistä on, että lujuustuloksien keski-  
näinen hajonta muista syistä johtuen olisi suurempaa kuin lisäkypsyiden tuoma lujuudenke-  
hitys.

### 6.3 Betonirakenteen vaatimuksenmukaisuuden toteaminen

Betonin kelpoisuus arvostellaan määrittämällä arvosteluerän vertailulujuus. Vertailulujuu-  
den tulisi ylittää betonin lujuusluokan mukainen nimellislujuus, mikäli nimellislujuus alittuu  
vaatimuksenmukaisuutta on tutkittava tarkemmin. (BY 2016). Rakennenäytteitä/porakappa-  
leita käytettäessä 1-luokan rakenteissa arvosteluerä on hyväksyttävä, kun vertailulujuus on  
vähintään 85 % nimellislujuudesta. (RakMK B4 6.3.4)

Kun koekappaleita on vähintään 15 vertailulujuus lasketaan kaavalla 12, jonka kahdesta va-  
riaatiosta pienemmän tuloksen antava jää voimaan. Vertailulujuus ilmoitetaan 0,1 MN/m<sup>2</sup>  
tarkkuudella.

$$\begin{aligned} K_k &= f_{cm} - 1,48 \text{ tai} \\ K_k &= f_{cmin} + 4 \end{aligned} \quad (12)$$

missä

$f_{cm}$	koetulosten keskiarvo
$f_{cmin}$	pienin koetulos
s	otoskeskihajonta

$$\rightarrow K_k = f_{cm} - 1,48 = (50,1 - 1,48) \text{ MPa} = 48,62 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow K_k = f_{cmin} + 4 = (39,6 + 4) \text{ MPa} = 43,6 \text{ MPa}$$

Rakennenäytteitä/porakappaleita käytettäessä 1-luokan rakenteissa arvosteluerä on hyväk-  
syttävä, kun vertailulujuus on vähintään 85 % nimellislujuudesta. (RakMK B4 6.3.4)

Tarkastellun rakenteen lujuus vastaa 97 % (43,6 / 45) nimellislujuudesta ja on hyväksyttävä.

## 6.4 Tiheyden kehitys valmistusketjussa

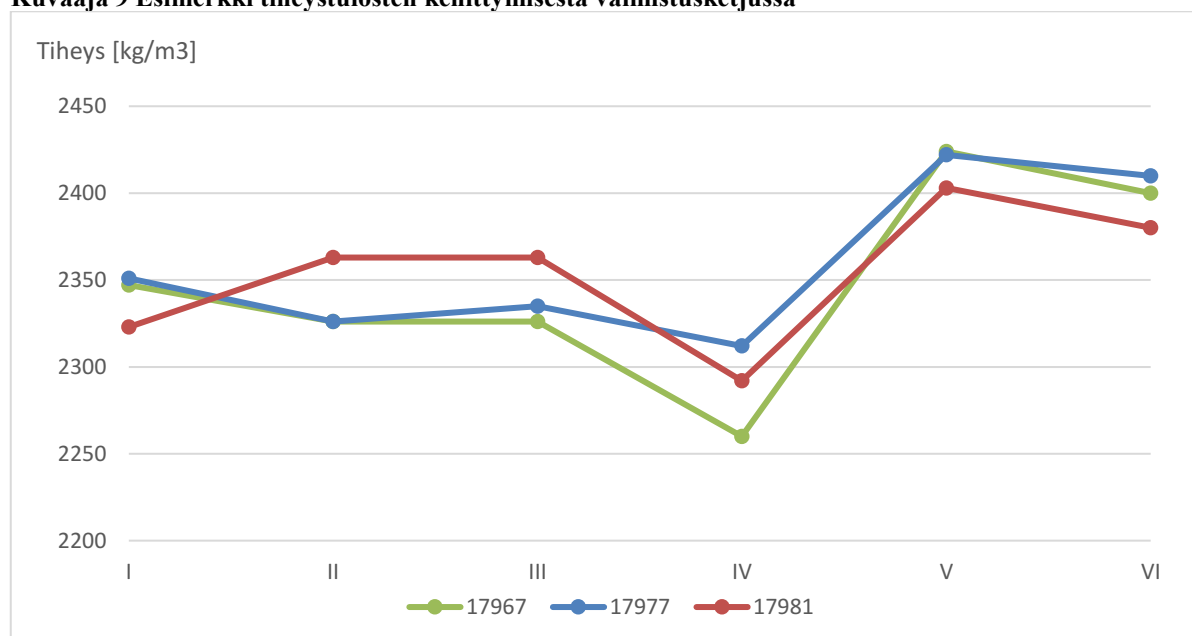
Tutkimuksessa tarkasteltujen betonikuormien tiheys pystyttiin määrittämään useilla aiemmin esitetyillä tavoilla laadunvalvonnan eri vaiheissa. Taulukkoon 13 on koottu yhteen aiemmin esitettyjä tuloksia.

**Taulukko 13 Esimerkki kolmen betonierän tiheysmäärittämisestä valmistusketjussa**

kk-nro	(I)Teoreettinen tiheys valmistus [kg/m <sup>3</sup> ]	(II) Betoni-asema, mitattu [kg/m <sup>3</sup> ]	(III)Työmaa (KA), mitattu [kg/m <sup>3</sup> ]	(IV) Rakennekoekappale [kg/m <sup>3</sup> ]	(V) Betoniase-makappale [kg/m <sup>3</sup> ]	(VI) Työmaa-koekappale [kg/m <sup>3</sup> ]
17967 #16	2347	2326	2326	2260 (1kpl)	2424	2400
17977 #32	2351	2326	2335	2312 (5kpl)	2422	2410
17981 #16	2323	2363	2363*	2292 (5kpl)	2403	2380

\*työmaatulokset puuttuvat

**Kuvaaja 9 Esimerkki tiheystulosten kehittymisestä valmistusketjussa**



Seurattaessa tiheyden kehitystä valmistusketjussa tässä tutkimuksessa saaduista mittaustuloksista voidaan tehdä ainakin kolme havaintoa:

1. Tiheyden seuraamiseen liittyy selvästi muita betonin laatuominaisuuksia enemmän hajontaa ja virhelähteitä, joiden suuruusluokkaa on erikseen käsitelty luvussa 6.5.
2. Tuoreesta betonista ja kovettuneen betonista määritetty tiheys eivät mittausmenetelmiin liittyvistä osittain tuntemattomista syistä olleet näiden tulosten osalta vertailukelpoisia. Tuoreeseen betoniin ei liity erityisiä ongelmia, vaan haasteet ovat kovettuneen betonin tiheyden määrittämisessä. Porakoekappaleiden, tuoreen betonin ja normikoekappaleiden tiheyden suuruusluokat eivät vastaa suoraan tunnistettuja ilmiöitä.

Betonin kosteustila, toteutunut ilmamäärä, mahdollinen erottuminen ja toteutunut tiivistys vaikuttavat suuresti tiheystuloksiin ollen selittäjiä saaduille tuloksille.

Tarkasteltaessa samaa valmistuserää tuoreen betonin tiheydelle saadut arvot ovat luokkaa alhaisempia kuin kovettuneelle betonille määritetyt tiheysarvot, kun käytetään suuria koekappaleita (normikoelieriö, 150x300 mm). Pienillä kappaleilla (poralieriö, 100x100 mm) tilanne vaikuttaa olevan päinvastainen, joskin erot tiivistymisessä voivat selittää tuloksia.

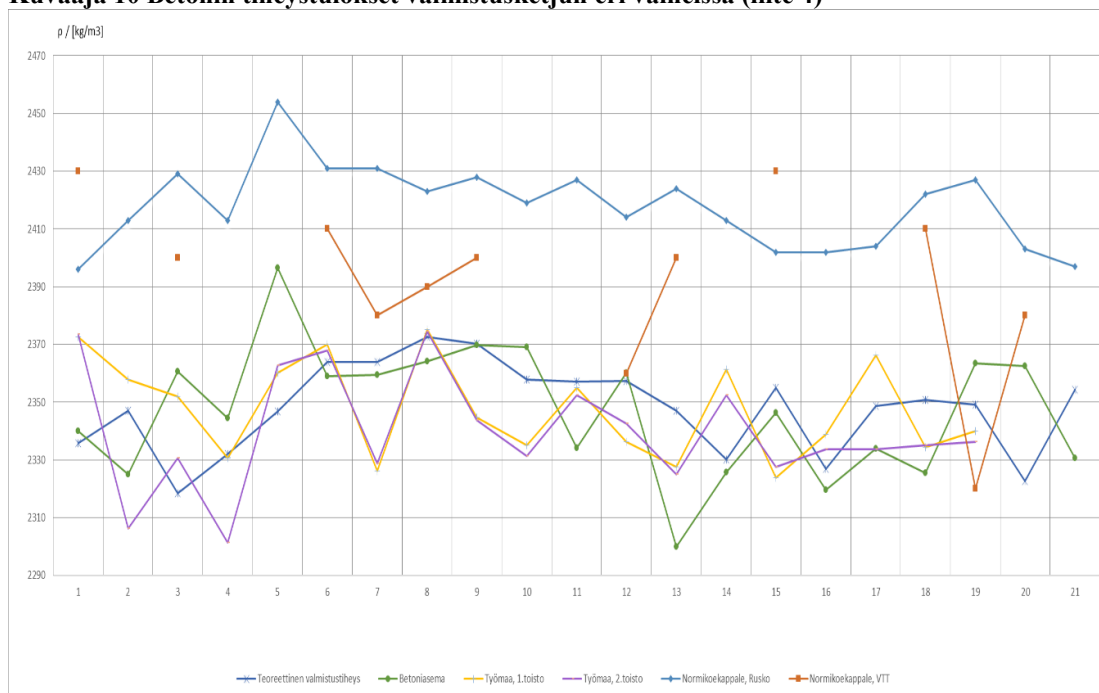
Tulokset antavat aiheen epäillä, että vakiintunut tapa määrittää betonin tiheys mittaamalla ja punnitsemalla 150x300 mm normipuristuskoeleiriö soveltuu lähinnä betonituotannon sisäiseen vertailuun samassa mittauspisteessä.

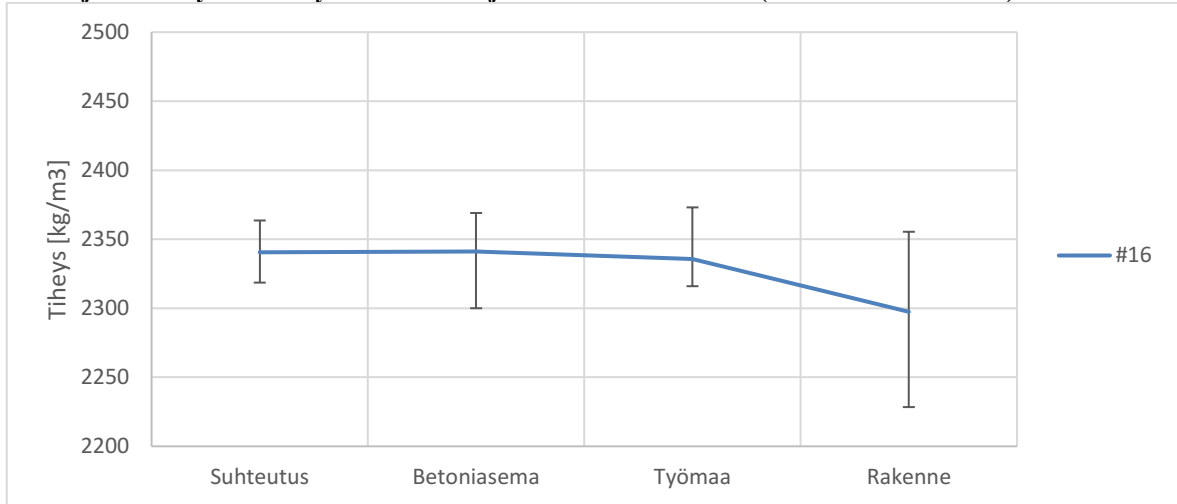
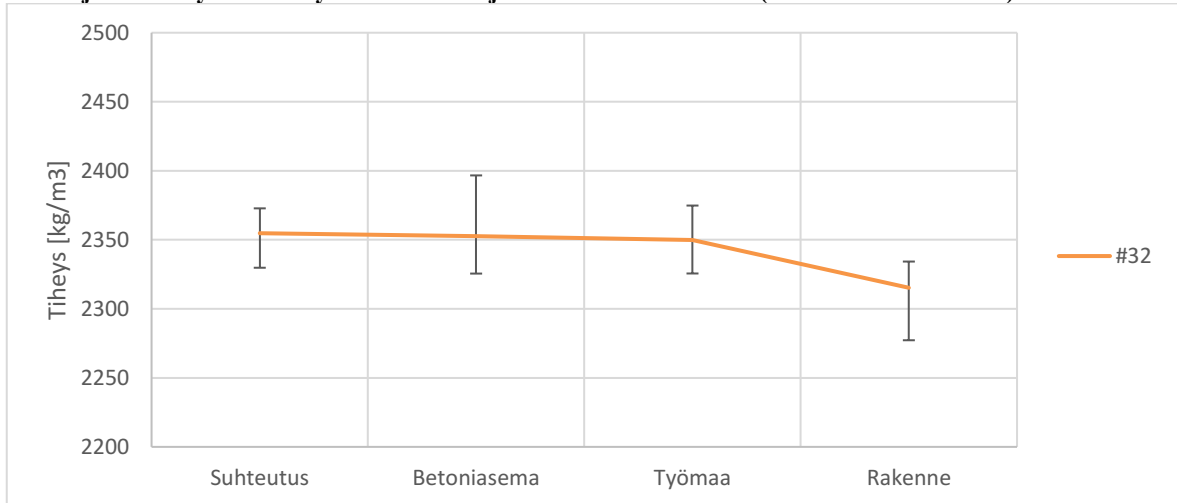
- Ilmamäärän tarkan kehittymisen seuranta tiheyden avulla tuoreen betonin mittauspisteiden välillä ei käytännössä ole mahdollista. Valmistusketjussa syntyviä eroja ei havaita, kun muutokset ovat vähäisiä eli kun ei ole tapahtunut merkittävää ylihuokoistumista. Tiheyttä voidaan käyttää ilmamäärän suuruusluokan tunnistamiseen (2, 5 tai 10 %) ja sitä kautta valmistuksen sekä laadunvalvonnan ohjaamiseen.

Tiheyden mittaamisen virheet, yleinen hajonta ja betonin tiivistysilman määrä häivyttävät ilmamäärän muutoksen vaikutuksia tiheyteen siirryttäessä betoniasemalta työmaalle. Kohdan 6.2 perusteella kuitenkin tiedetään varsin luotettavasti betonin ilmamäärän kohonneen valmistusketjun aikana noin 2,5 %, mikä laskee betonin aitoa tiheyttä. Tämä muutos ei luotettavasti näy tuloksissa.

Myös tiheyden hyödyntäminen laskennallisen ilmamäärän määrittämiseen vaikuttaa tuottavan suurta hajontaa suhteessa mitattuun ilmamäärään. Kohdassa 5.1 tehtiin esimerkkitarkastelu betoniasemalla, jossa todellinen hajonta tässä tutkimuksessa oli vähäisintä.

**Kuvaaja 10 Betonin tiheystulokset valmistusketjun eri vaiheissa (liite 4)**



**Kuvaaja 11 Tiheyden kehitys valmistusketjussa vaihteluvälineen (#16 maksimiraekoko)****Kuvaaja 12 Tiheyden kehitys valmistusketjussa vaihteluvälineen (#32 maksimiraekoko)**

Vaihteluvälikuvaajissa (kuvaajat 11 & 12) on esitetty graafisesti tiheyden keskiarvo ja pienin sekä suurin arvo kussakin valmistusketjun pisteessä. Kuvaajat osoittavat havaintojen suuren vaihtelun samassa betonimassalla ja hankaluudet tulosten arvioinnissa.

## 6.5 Tiheyden määrittämiseen liittyvät virheet

Betonin tiheyden luotettavaa vertailua häiritsevät työ- ja mittavirheet sekä mahdollinen epävarmuus kovettuneen betonin kosteustilasta. Mittavirheiden suhteellinen merkitys kasvaa kappaleen koon pienentyessä.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty käytäntöön ja mittausmenetelmään perustuva arvio mitausvirheen aiheuttamasta vaihtelusta sekä standardien arvioita tiheyden mittaustarkkuudesta. On huomattava, että myös standardien viitearvojen taustalla olevissa tutkimuksissa (toistettavuus/uusittavuus) on betonin koostumuksessa esiintynyt toistojen välillä pientä vaihtelua, joka on mukana näiden viitetuloksissa.

### 6.5.1 Kyllästysasteen vaikutus tiheyteen käytettäessä todellisia mittoja

Poranäytteistä valmistetut puristuskoeappaleet otettiin kuivamaan 3 vrk laboratorion huoneilmaan ja punnittiin vesialtaasta poistamisen yhteydessä täysin kyllästettyinä sekä toisen kerran ennen puristuskoeetta. Taulukossa esitetyistä massoissa on tehty teräskompensaatio.

**Taulukko 14 Puristuskoeappaleiden mittaamalla määritetyt tiheydet**

LABORATORIO, VTT				Tunnus	PK Kapilaarisesti kyllästetty massa (mitoista)	PK Pinta-kuiva massa (mitoista)	PK Kapilaarisesti kyllästetty tiheys	PK Pinta-kuiva massa tiheys	Tiheysero	
nro	kk-nro	m3	#		[g]	[g]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	%
13	17967	8	16	A4A	1509,9	1499,9	2266	2251	15	0,7
				A4Y	1489,1	1477,1	2235	2217	18	0,8
14	17970	12	32	A1A	-	1509,0	-	2265	-	-
				A1Y	-	1454,0	-	2230	-	-
14	17970	12	32	A3A	1514,0	1503,0	2273	2256	17	0,7
				A3Y	1506,0	1494,0	2261	2243	18	0,8
16	17974	12	16	B1A	1537,0	1527,0	2307	2292	15	0,7
				B1Y	1518,0	1506,0	2279	2261	18	0,8
16	17974	12	16	B2A	-	1524,6	-	2288	-	-
				B2Y	-	1525,0	-	2289	-	-
16	17974	12	16	B3A	1553,9	1543,9	2332	2317	15	0,6
				B3Y	1519,0	1508,0	2280	2264	17	0,7
16	17974	12	16	B4A	1534,0	1525,0	2303	2289	14	0,6
				B4Y	1541,0	1531,0	2313	2298	15	0,6
16	17974	12	16	B5A	1519,0	1509,0	2280	2265	15	0,7
				B5Y	1553,7	1542,7	2332	2316	17	0,7
18	17977	8	32	C1A	1542,9	1533,9	2316	2302	14	0,6
				C1Y	1478,0	1467,0	2290	2273	17	0,7
18	17977	8	32	C2A	1526,3	1517,3	2291	2278	14	0,6
				C2Y	1503,8	1492,8	2257	2241	17	0,7
18	17977	8	32	C3A	1530,0	1520,0	2297	2282	15	0,7
				C3Y	1494,3	1484,3	2243	2228	15	0,7
18	17977	8	32	C4A	-	1516,0	-	2276	-	-
				C4Y	-	1527,0	-	2292	-	-
18	17977	8	32	C5A	1548,8	1538,8	2325	2310	15	0,6
				C5Y	1494,0	1482,0	2243	2224	18	0,8
20	17981	12	16	D1A	1522,0	1511,0	2285	2268	17	0,7
				D1Y	1475,0	1463,0	2214	2196	18	0,8
20	17981	12	16	D2A	1468,0	1455,0	2203	2184	20	0,9
				D2Y	1494,0	1482,0	2243	2224	18	0,8
20	17981	12	16	D3A	1538,0	1527,0	2309	2292	17	0,7
				D3Y	1460,0	1446,0	2191	2170	21	1
20	17981	12	16	D4A	1491,0	1479,0	2238	2220	18	0,8
				D4Y	1478,0	1466,0	2218	2200	18	0,8
20	17981	12	16	D5AK	1483,0	1469,0	2226	2205	21	0,9
				D5Y	1451,0	1436,0	2178	2155	23	1
			x				2267	2255	17	0,7
			s				42	42	2	0,1
			min				2178	2155	14	0,6
			max				2332	2317	23	1,0

Kappaleiden tarkkaa kosteustilaa laboratorion punnituksissa ei tunneta, mutta sen voidaan olettaa tasaantuneen 3 vrk aikana. Kappaleen huokosten kuivuessa kosteutta poistui 10-15g 1500 g koekappaletta kohti, mikä vastasi keskimäärin  $13 \text{ kg/m}^3$  tiheydenmuutosta.

Tässä tutkimuksessa n. 100x100 mm leiriökoekappaleiden huokosista täyden kyllästymisen jälkeen poistunut vesi alensi mitatuilla mitoilla laskettua tiheyttä keskimäärin 0,7 %, mikä vastaa  $15\text{-}20 \text{ kg/m}^3$  (taulukko 12).

$$\Delta\rho_{\text{kyllästysastevirhe 6.5.1}} = \pm 15 - 20 \text{ kg/m}^3$$

On todennäköistä, että poistuva vesimäärä ja siitä seuraava tiheysvaihtelu on riippuvainen koekappaleen ulkopintojen alan suhteesta massaansa sekä betonin vesi-sementtisuhteesta (betonin kokonaishuokoisuus ja kapilaarihuokosten osuus).

$$n_{\text{pinta-ala/massa}} = \frac{2\pi rh + 2 * \pi r^2}{m} = 63,4 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

### 6.5.2 Ilmamääräastian täyttäminen tai tiivistäminen

Tässä tutkimuksessa tuoreen betonin tiheys määritettiin punnitsemalla betonilla täytetty ilmamäärämittarin astia, jonka tilavuus oli  $8 \text{ dm}^3$ . Ilmamäärämittarin tilavuus vastaa lieriön tilavuutta, jossa korkeus on betonimassan korkeus astiassa. Astian betonitilan halkaisija oli 200 mm ja säde 100 mm.

$$V_{\text{lieriö}} = \pi * r^2 * h \quad (12)$$

missä

$\pi$	pii, vakio
$r$	lieriön säde [mm]
$h$	lieriön korkeus [mm]

Täydellisesti täytetyssä astiassa betoninäytteen korkeus on tällöin noin 255 mm. Ilmamääräastian ylitäyttämistä ja pastan tiivistämistä reunojen yli tulee välttää, joten mahdollista on, että mittaustilanteessa astia jää aavistuksen vajaaksi.

Tarkastellaan realistista tilannetta, missä ilmamääräastia on paikoin vajaa. Kun astian täytön korkeuden keskimääräinen vajoaus on 1,5 mm, astian tilavuus jää 0,6 % vajaaksi.

$$V_{\text{mitta-astia.täysi}} = \pi * (0.100 \text{ m})^2 * 0.2547 \text{ m} = 8,00 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{mitta-astia.vajaa}} = \pi * (0.100 \text{ m})^2 * 0.253 \text{ m} = 7,95 \text{ dm}^3$$

$$\Delta\rho_{\text{esim.täyttövirhe 6.5.2}} = \frac{V_{\text{mitta-astia.vajaa}} - V_{\text{mitta-astia.täysi}}}{V_{\text{mitta-astia.täysi}}} * \rho_{\text{betoni}}$$

$$= -0,625 \% * 2350 \frac{kg}{m^3} = -14,7 \frac{kg}{m^3}$$

Mittausstandardin (SFS 12350-6) viitearvot tuoreen betonin määrityksen tarkkuudelle on esitetty taulukossa 15. Standardin pohjana olevassa laajassa tutkimuksessa oli käytetty suurempaa 10 dm<sup>3</sup> mittausastiaa kuin tässä tutkimuksessa. Voidaankin arvioida, että ilmamäärämittarin osalta tarkkuus on jo lähtökohtaisesti hieman taulukon 15 tuloksia heikompi.

**Taulukko 15 Viitearvot tuoreen betonin tiheyden määritykselle (SFS 12350-6)**

Vaihtelualue kg/m <sup>3</sup>	Toistettavuus		Uusittavuus	
	$S_r$ kg/m <sup>3</sup>	$r$ kg/m <sup>3</sup>	$S_R$ kg/m <sup>3</sup>	$R$ kg/m <sup>3</sup>
2300...2400	5,5	15	10,2	29

Toistettavuus esittää keskihajonnan ja kahden tuloksen suurimman erotuksen saman mittauksen samoilla mittalaitteilla. Tuloksen uusittavuus esittää keskihajonnan ja kahden tuloksen suurimman erotuksen, kun mittaukset tekee toinen henkilö toisella laitteella samasta massasta. Kaikissa viitearvot on esitetty 95 % luottamusväliä käyttäen, eli ne ovat tilastollisesti totta 95 % tapauksista (19/20).

Tässä tutkimuksessa betoniasemalla ja työmaalla ilmamäärämittarin astialla tehdyissä tiheysmittauksissa voidaan arvioida olevan mittausmenetelmästä johtuvia yksittäisiä virheitä  $\pm 20$  kg/m<sup>3</sup>.

$$\Delta\rho_{\text{mittaussuoritusvirhe 6.5.2}} = \pm 20 \frac{kg}{m^3}$$

### 6.5.3 Normikoekappalelieriön mittatarkkuus

Betonitestauksessa käytetään yleisesti kalibroituja teräslieriömuotteja, joiden mitat ovat hyvin tarkasti 150 x 300 mm. Betonilieriön pinta tasataan vaiheittaisen täytön jälkeen, mutta todellisuudessa valmiiden betonikoekappaleiden päät saattavat olla vinoja ja hieman vajaita.

Mikäli koekappaleen korkeutta mitattaessa tehtiin 1 mm arviointivirhe, vaikutus mitoista määritettyyn tiheyteen oli kappaleen 6.5.2 tavoin.

$$V_{\text{teräslieriö.täysi}} = \pi * (0.075 \text{ m})^2 * 0.300 \text{ m} = 5,30 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{teräslieriö.vajaa}} = \pi * (0.075 \text{ m})^2 * 0.299 \text{ m} = 5,28 \text{ dm}^3$$

$$\Delta\rho_{\text{esim.mittavirhe 6.5.3}} = \frac{V_{\text{teräslieriö.vajaa}} - V_{\text{teräslieriö.täysi}}}{V_{\text{teräslieriö.täysi}}} * \rho_{\text{betoni}}$$

$$= -0,34 \% * 2350 \frac{kg}{m^3} = -7,8 \frac{kg}{m^3}$$



Työmaan koekappaleet mitattiin ennen koestusta ja niiden halkaisija oli mittatarkka. Valmistuksessa havaittiin kuitenkin lieriöihin syntyneen 300+2 mm korkeusvaihtelu. Työmaan koekappaleiden tiheystuloksissa on mahdollisesti edelleen 1mm mittavirheen verran yksittäisiä tästä johtuvia virheitä +8 kg/m<sup>3</sup>.

Betoniaseman koekappaleita ei mitattu puristuskokeiden yhteydessä ja on todennäköistä, että niissä esiintyi työmaakoekappaleita vastaava +- 2mm korkeusvaihtelu. Betoniaseman kappaleiden tiheystuloksissa on mahdollisesti +-15 kg/m<sup>3</sup> tästä johtuvaa virhettä.

$$\Delta\rho_{\text{mittatarkkuus 6.5.3}} = \pm 15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 6.5.4 Kovettuneen betonin koekappaleen mittaaminen

Tässä tutkimuksessa tarkastellut porakoekappaleet olivat lieriöitä, joiden halkaisija oli 94 mm ja korkeus 96 mm. Mikäli koekappaleen korkeutta mitattaessa tehtiin 1 mm arviointivirhe, vaikutus mitoista määritettyyn tiheyteen oli kappaleen 6.5.2 tavoin.

$$V_{\text{porakappale}} = \pi * (0.047 \text{ m})^2 * 0.094 \text{ m} = 0,652 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{porakappale.mittavirhe}} = \pi * (0.047 \text{ m})^2 * 0.093 \text{ m} = 0,645 \text{ dm}^3$$

$$\Delta\rho_{\text{esim.mittavirhe 6.5.4}} = \frac{V_{\text{porakappale.mittavirhe}} - V_{\text{porakappale}}}{V_{\text{porakappale}}} * \rho_{\text{betoni}}$$

$$= -1,07 \% * 2350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = -25,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Rakenteesta poratun koekappaleen 1mm mittavirhe aiheuttaa määritettyyn tiheyteen suurusluokaltaan yhtä suuren virheen kuin aiemmin tarkasteltu 3 mm mittavirhe normikoelieriössä. Lieriöiden korkeuden suhteen tulos on lineaarinen ja tämän tutkimuksen rakennekoekappaleen mittaamisessa 1 mm mittavirheen realistinen arvio on +- 25 kg/m<sup>3</sup>.

$$\Delta\rho_{\text{mittatarkkuus 6.5.4}} = \pm 25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**Taulukko 16 Viitearvot kovettuneen betonin tiheyden määrittämiselle (SFS 12390-7)**

Testausmenetelmä	Toistettavuus		Uusittavuus	
	$S_r$ kg/m <sup>3</sup>	$r$ kg/m <sup>3</sup>	$S_R$ kg/m <sup>3</sup>	$R$ kg/m <sup>3</sup>
Laskemalla käyttäen mitattuja mittoja:				
100 mm kuutiot	13,9	39	20,5	57
150 mm kuutiot	9,9	28	20,5	57
Vesipunnitus:				
100 mm kuutiot	6,5	18	12,8	36
150 mm kuutiot	6,4	18	10,6	30

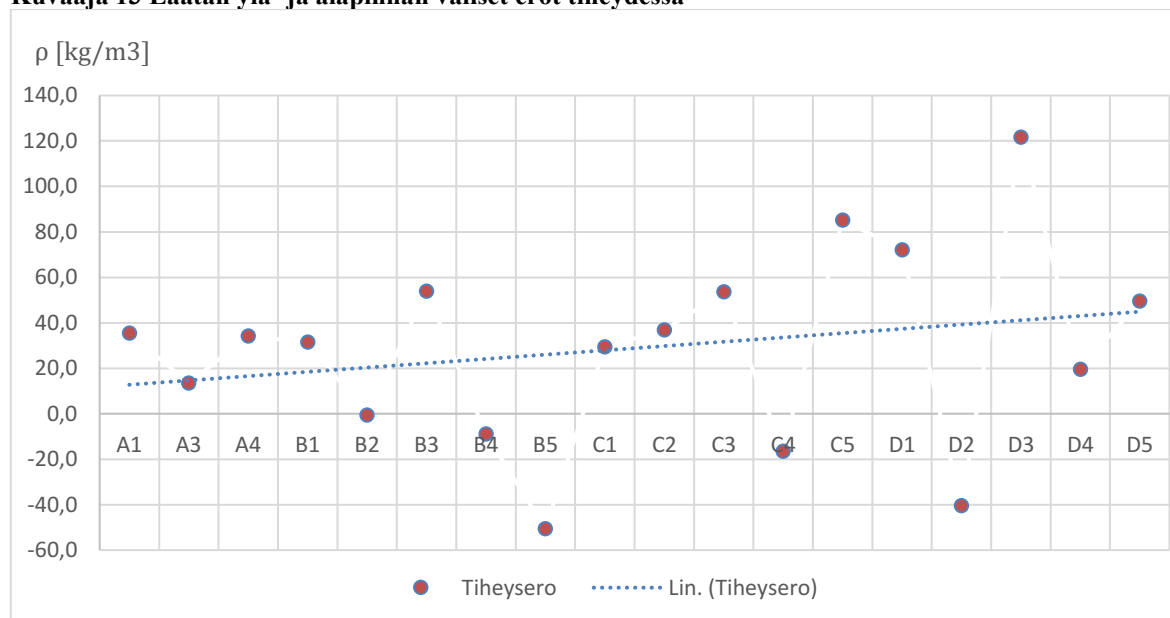
Viitearvot kovettuneen betonin tiheyden määrittämiselle on esitetty mukaan taulukossa 13. Testausmenetelmän toistettavuus 150 mm koekuutiolle 95 % luottamusvälillä käyttäen mitattuja mittoja 28 kg/m<sup>3</sup>.

Taulukossa 16 esitetyistä arvioista voidaan nähdä, että koekappaleen sivumittojen kasvattaminen 50 % (tilavuus 2,75-kertaistuu) pienentää mittaamisen aiheuttamaa suurinta virhettä noin 30 %. Huomionarvoista on, ettei koekappaleen koon kasvattamisella ole vastaavaa merkitystä, kun tiheys määritetään punnitsemalla kappale vedessä ja ilmassa.

## 6.6 Betonilaatan poikkileikkauksen ylä- ja alapinnan tulokset

Tutkimuksen yhtenä lähtökohtana oli hypoteesi, että betonin työstäminen saa massan erottumaan siinä määrin, että betonin ominaisuudet eroavat toisistaan rakenteen ylä- ja alapinnassa. Käytännössä betonin kiviaines painuu kohti pohjaa ja sementtipastan suhteellinen osuus yläpinnassa kasvaa. Tällöin laatan yläpinnan huokoisuus ja ilmamäärä kasvavat, minkä tulisi laskea betonin tiheyttä ja puristuslujuustulosta. Tässä esitetty arvio erottumisesta perustuu ylä- ja alapinnan porakoe-kappaleiden mittaamalla ja punnitsemalla määritettyihin tiheyksiin. Tarkastelussa on käytetty tiheyttä ennen puristusta, sillä siitä tulos löytyy yhtenäisesti koko otokselle.

Kuvaaja 13 Laatan ylä- ja alapinnan väliset erot tiheydessä



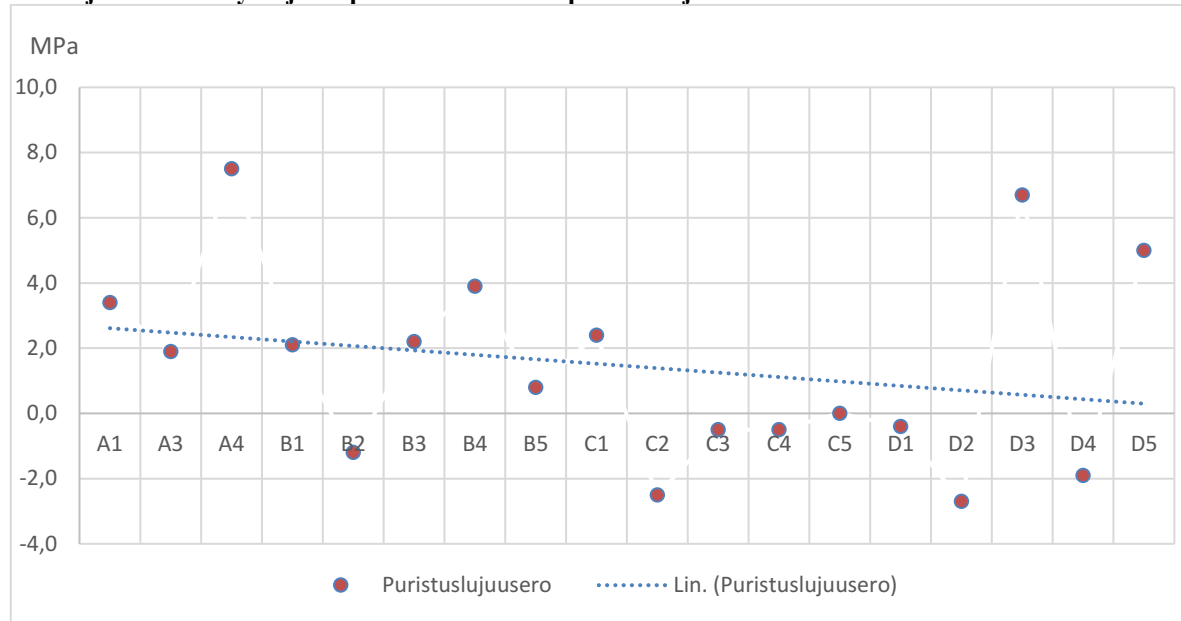
Betonilaatan alapinnan tiheys osoittautui keskimäärin yläpintaa suuremmaksi (kuvaaja 13) ja voidaan havaita trendin olevan suuruusluokkaa 30 kg/m<sup>3</sup>, mikä vastaa noin 1,5 % betonin tiheydestä (taulukko 18). Betonin poikkileikkauksen tiheyden voidaan katsoa olevan alapinnassa pienempi 4/18 ja yläpinnassa pienempi 14/18 tapauksista. On huomattava, että arvioinnissa käytettyihin tiheystuloksiin sisältyy paljon hajontaa. Tuloksen vaihtelu on muutenkin merkittävää, mutta voidaan arvioida, että tulokset ennemmin tukevat kuin haastavat ilmiön olemassa oloa.

Kuvaajan 13 perusteella on myös mahdollista tehdä tulkinta, että erottuminen keskimäärin lisääntyisi kuljettaessa porausalueelta A suuntaan D. Käytännössä tämä on myös työmaalla toteutunut kannen valusuunta ja on mahdollista, että työsuorite olisi alkuvaiheessa ollut tarkempi ja tasaisempi, mikä voidaan ottaa mukaan yhdeksi tulosten selittäjäksi.

Taulukko 17 Laatan ylä- ja alapinnasta valmistettujen koekappaleiden tulokset

LABORATORIO, VTT				Tunnus	Tiheys pinta- kuivana	Tiheysero alapinta (A) -yläpinta (Y)		Puristuslujuus	Puristuslujuus alapinta (A) -yläpinta (Y)	
nro	kk-nro	m3	#		[kg/m3]	[kg/m3]	%	MPa	MPa	%
13	17967	8	16	A4A*	2251	35	1,6	53,5	7,5	14,0
				A4Y*	2217			46,0		
14	17970	12	32	A1A	2265	14	0,6	52,4	3,4	6,5
				A1Y	2230			49,0		
14	17970	12	32	A3A	2256	34	1,5	51,3	1,9	3,7
				A3Y	2243			49,4		
16	17974	12	16	B1A	2292	32	1,4	49,4	2,1	4,3
				B1Y	2261			47,3		
16	17974	12	16	B2A*	2288	-1	0,0	52,9	-1,2	-2,3
				B2Y	2289			54,1		
16	17974	12	16	B3A*	2317	54	2,3	54,4	2,2	4,0
				B3Y	2264			52,2		
16	17974	12	16	B4A	2289	-9	-0,4	50,9	3,9	7,7
				B4Y	2298			47,0		
16	17974	12	16	B5A	2265	-51	-2,2	51,9	0,8	1,5
				B5Y*	2316			51,1		
18	17977	8	32	C1A*	2302	29	1,3	53,4	2,4	4,5
				C1Y	2273			51,0		
18	17977	8	32	C2A*	2278	37	1,6	53,0	-2,5	-4,7
				C2Y*	2241			55,5		
18	17977	8	32	C3A*	2282	54	2,4	49,7	-0,5	-1,0
				C3Y*	2228			50,2		
18	17977	8	32	C4A	2276	-17	-0,7	52,1	-0,5	-1,0
				C4Y	2292			52,6		
18	17977	8	32	C5A*	2310	85	3,7	53,3	0,0	0,0
				C5Y	2224			53,3		
20	17981	12	16	D1A	2268	72	3,2	46,0	-0,4	-0,9
				D1Y	2196			46,4		
20	17981	12	16	D2A	2184	-41	-1,9	46,2	-2,7	-5,8
				D2Y	2224			48,9		
20	17981	12	16	D3A	2292	122	5,3	52,3	6,7	12,8
				D3Y	2170			45,6		
20	17981	12	16	D4A	2220	20	0,9	47,8	-1,9	-4,0
				D4Y	2200			49,7		
20	17981	12	16	D5AK	2205	50	2,2	45,0	5,0	11,1
				D5Y*	2155			39,6		
			x		2255	29	1,3	50,1	1,5	2,8
			s		42	43	1,9	3,4	3,0	5,9
			min		2155	-50	-2,2	39,6	-2,7	-5,8
			max		2317	122	5,3	55,5	7,5	14,0

\*Tuloksiin vaikuttavat koekappaleiden sisältämät teräskaset. Vaikutus tiheyteen korjattu kohtuullisen luotettavasti.  
Vaikutus puristuslujuustuloksiin tuntematon, mutta kappaleiden murtotavoista ja -kuormista päätellen vähäinen.

**Kuvaaja 14 Laatan ylä- ja alapinnan väliset erot puristuslujuudessa**

Laatan poikkileikkauksen puristuslujuustulokset ovat korkeampia laatan pohjalla ja keskiarvo noudattaa hypoteesia (kuvaaja 14). Tulosten trendi on positiivinen ja poikkileikkauksen alapinnan puristuslujuus keskimäärin 1,5 MPa yläpintaa korkeampi, mikä vastaa laatan keskimääräisestä 3 % puristuslujuudessa. Rakenteen C-sektorin alueella tulokset ovat poikkeukselliset, eikä laatan ylä- ja alapinnan välillä esiinny minkäänlaista havaittavaa eroa, mihin todennäköisin selittäjä on sattuma. Tuloksen vaihtelu on muutenkin merkittävää, mutta voidaan arvioida, että tulokset ennemmin tukevat kuin haastavat ilmiön olemassa oloa.

Poranäytteet otettiin kuormitetusta laattarakenteesta, jonka yläpinta on puristettu ja alapinta on vedetty. Pääasialliset kuormat rakenteessa kantavat massiiviset jälkijännitetyt palkit, mutta myös laattaosalla rakenteen alapinta voi olla halkeillut, mikä heikentäisi sen puristuslujuutta (Neville 1995). Tämä vaikutus ei kuitenkaan esiinny erityisesti esimerkiksi C-sektorilla muita lohkoja voimakkaammin.

Tarkasteltu laattarakenne on 300 mm paksu, mikä käytännössä tarkoittaa, että kansi on valettu yhdessä kerroksessa. Tämän tyyppisessä tilanteessa erottuminen todennäköisesti ei ole merkittävää ja ilmiön potentiaalista vaikutusta yleisemmin on haastava arvioida saatujen tulosten perusteella.

## 7 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin yhden betonirakeen tuotantoprosessia ja toimitusketjun laadunvarmistusta kokonaisuutena. Koejärjestelyt vastasivat poikkeuksellisen hyvin normaalia betonirakentamista ja tuottivat siten uutta kokeellista käytännön tietoa. Tutkimus toteutettiin talvibetonointiaikana, jolloin olosuhteet olivat kaikin puolin haastavat. Lämpötilan kehityksen vaikutus huomioitiin kypsyysikäarvion avulla.

Betonin toteutunut ilmamäärä on keskeisessä asemassa vaativien olosuhteiden betonirakenteiden säilyvyydessä ja toteutuvassa lujuudessa. Saadut tulokset antoivat tukea sille, että betonin ilmamäärän määrittäminen on perusteltua käyttää vaativien betonirakenteiden, siltojen ja muiden jäätymis-sulamisrasitettujen betonirakenteiden ensisijaisena laadunvalvontamenetelmänä. Tarkastellulla betonilla havaittiin sekoituksessa vapautumatonta ilmamääräpotentiaalia, kun ilmamäärä nousi valmistusketjussa keskimäärin 1,4 % betoniasemalta työmaalle ja arviolta 1,0 % työmaalta valmiiseen rakenteeseen. Työmaasekoituksen aikana ilmamäärä mitattiin kuormasta kahdesti: 1/3 ja 2/3 purun jälkeen, mutta näiden välillä ei keskenään havaittu tilastollista eroa. Ilmamäärämittaustulokset osoittautuivat hyvin luotettaviksi.

Betonin puristuslujuus rakenteessa kehittyi vallitsevien lämpötilaolosuhteiden mukaisesti. Betoniaseman ja työmaan normikoe-kappaleiden havaittiin vastaavan toisiansa hyvällä luotettavuusasteella siten, että havaittu 5 % ero tuloksissa selittyy eroilla puristustapahtumassa, puristimessa ja puristuskappaleen suoristustavassa. Porattujen rakennekoe-kappaleiden puristuslujuuden todettiin vastaavan 83 % työmaakoe-kappaleen lujuudesta arvioidussa 28 vrk iässä, mikä vastaa hyvin yleistä tutkittua käsitystä. Lisäksi betonin lujuuden kehityksen tunnetaan jatkuvan rakenteessa vähäisissä määrin jopa kymmeniä vuosia näytteenoton jälkeen.

Betonin tiheyteen vaikuttavat erot kosteustilasta, ilmamäärästä ja sementtipastan tilavuusosuudessa. Tulosten perusteella tiheyden seuraamiseen liittyy betonin muita laatuominaisuuksia enemmän hajontaa ja virhelähteitä, jotka tekevät tiheyden laajemmasta soveltamista betonin laadunvalvonnassa käytännössä vaikeaa. Valmistusketjun muutosten seurantaan tai yhdistämiseen takaisin betonin ilmamäärään todettiin liittyvän huomattavia epävarmuuksia.

Tiheyden hajonta osoittautui mittauspisteiden sisällä hyvin hallituksi, usein luokkaa 20 kg/m<sup>3</sup>, mutta vertailukelpoisuus tuoreen ja kovettuneen betonin välillä on heikko. Tuoreen betonin tiheydeksi määritettiin tämän tutkimuksen eri vaiheissa noin 2260-2330 kg/m<sup>3</sup>, kun kovettuneen betonin lieriökoekappaleen tiheydeksi raportoitiin mittoja käyttäen noin 2400 kg/m<sup>3</sup>. Ilmassa ja vedessä punnitsemalla tiheydestä todettiin saatavan vertailukelpoisia tuloksia ja valmiista rakenteen tiheydeksi oli keskimäärin 2300 kg/m<sup>3</sup>. Tiheyteen liittyville tuloksia selittävät todennäköisimmin erot koekappaleiden tiivistystavassa, koekappaleiden ylitiivistys tai tiivistyspuutteet rakenteessa. Aidon rakenteen onnistunut ja tasainen tiivistäminen on hyvin haastavaa huokostettua betonia käytettäessä, mitä myös tulokset ilmentävät.

Laattarakenteen ylä- ja alapintojen lujuudessa ja tiheydessä havaittiin vähäisiä muutoksia tiivistyksen aiheuttamasta erottumisesta johtuen. On todennäköistä, että sementtipastan tilavuus osuus pintakerroksissa on kasvanut ja tällöin myös betonin ilmamäärä on vastaavasti jakautunut poikkileikkauksessa. Paksuudeltaan 300mm laatasta betonin tiheys todettiin keskimäärin 30 kg/m<sup>3</sup> alhaisemmaksi laatan yläpinnassa. Tuloksen vaihtelu oli merkittävää, mutta voidaan arvioida, että tulokset tukevat ilmiön olemassa oloa.

Betonin laadunvalvontaa ohjaava normitus on rakennettu tilastomatematisille todennäköisyyksille ja ajatukselle, ettei betonin koostumus juuri muutu valmistusketjussa valmistuksen jälkeen. (Kronlöf & Klami 2017). Betonin ominaisuuksien on nykyaikaisten PCE-notkistimien myötä havaittu kehittyvän valmistuksen ja kovettumisen välillä betonin kuljetuksessa, pumppauksessa ja käsittelyssä työmaalla. Tässä tutkimuksessa saatiin tätä näkemystä tukevia tuloksia. Keskustelu laadunvalvonnan kehittämiseksi on aiheellista, mutta keskeistä on myös nykyisten määräysten tuntemus ja noudattaminen valmistusketjun eri vaiheissa.

Betonin laadun mittaamiseen liittyy myös monenlaista yleisesti hyväksyttyä epätarkkuutta, minkä vuoksi tarkka laadunhallinta on haastavaa. Mittaukset ovat standardoituja, mutta niiden tulokset voivat vaihdella merkittävästi mittavirheiden vuoksi tai mittauksen suorittavasta henkilöstä riippuen, kuten luvussa 6 havainnollistettiin. Myös luotettavana pidetty ilmamäärämittaus voi epäonnistua tai tulla tehdyksi eri tavoin. Esimerkiksi Kemijärven rata-sillan työmaalla kohonnutta ilmamäärää ei havaittu työmaalla (Matala 2016).

Betonikohun yhteenvedoksi laaditun Mäkikyrön selvityksen (2017) yhteenveto päättyy siihen, että betonirakentamisen laatuongelmat valmistusketjussa (suunnittelija-tilaaja-betonivalmistaja-työmaa) vaikuttavat olevan tapauskohtaisia ja riippuvaisia kaikista toimijoista. Aalto-yliopiston laajan Robust Air-tutkimuksen mukaan keskeisin epävarmuustekijä betonin laadussa on betonin lisäaineiden käyttäytyminen. (Al-Neshawy & Punkki 2017). Tämän tutkimuksen tulokset tukevat näitä näkemyksiä.

Tarkastellun betonirakenteen valmistus onnistui kokonaisuutena ja betonivalmistaja tunsikäyttämiensä lisäaineiden yhteisvaikutukset hyvin. Rakenteen toteutuneeksi ilmamääräksi voidaan arvioida 6,2 % ja vaatimuksenmukaisen puristuslujuuden sekä P30 -vaatimusten osalta voidaan todeta täyttyneen.

## **7.1 Seurantatutkimuksen toteuttamiseen liittyviä haasteita**

### **Betonin valmistuksessa**

- Kiviainesten kosteuden virhearviot, jotka muuttavat betonin koostumusta
- Vapautumaton ilmamääräpotentiaali (lisäaineiden tuntematon yhteisvaikutus)
- Mahdolliset kustannuspaineet optimoida betonin koostumusta
- Sekoitusajan vaihtelu ja kuljetusmatkojen vaihtelu asiakkaasta riippuen

### **Työmaalla**

- Suuria valuja ei välttämättä valvota 100 %, jolloin ”kukaan ei tiedä mitä tehtiin”
- Tiivistyksen laatu: puutteellinen tiivistys tai liiallinen erottumiseen johtava tiivistys.
- Betonin työmaakoekappaleiden olosuhteiden hallinta ja vertailukelpoisuus.
- Betonointityötavat- tai -järjestys eivät välttämättä vastaa suunniteltua
- Lämpötilaolosuhteita ja betonin todellista kypsyysikää ei tunneta

### **Rakennekoekappaleiden poranäytteenotossa**

- Betoniraudoituksen osumista on käytännössä hyvin haastava välttää.
- Poikkileikkauksessa terästä voi sijaita suunnitelmista poikkeavissa paikoissa
- Talviolosuhteissa lumi, jää ja pakkas voi estää poraamisen.
- Työmaaolosuhteissa kaikille alueille ei seuraavien työvaiheiden vuoksi ole pääsyä

## 7.2 Yhteenvedo betonin laatuun vaikuttavista tekijöistä

Betonin loppulaatuun vaikuttavia tekijöitä on koottu tämän työn pohjalta taulukkoon 18.

**Taulukko 18 Ydinhavainnot tekijöistä valmistusketjun hallitsemiksi**

TILAAJAN VAIKUTUS	BETONIVALMISTAJAN VAIKUTUS	TYÖMAATOIMINNAN VAIKUTUS	TULOSTEN TULKINTA	MUUT VAIKUTUKSET
Betonirakenteen valmistamisen tuntemus	Betoniteknologian osaaminen	Olosuhteiden huomioinen	Kyky ymmärtää laadunvalvontatuloksia	Valmistusketjussa havaitut ilmiöt
Kaikki osapuolet vaikuttavat lopputuotteen laatuun (tilaaja, betonivalmistaja ja työmaatoiminta)	Betonin lisäaineiden käyttäytymisen on muuttunut ja yhteisvaikutus saattaa kohottaa ilmamäärä valmistuksen jälkeen	Rakenteen dimensiot vaikuttavat lämmön- ja lujuuden kehitykseen myös alueille, jotka eivät ole mitoittavia	Tiheyden ja ilmamäärän välillä on riippuvuus, jonka havaitsemista häiritsee tiheyden mittaamiseen liittyvät useat virhelähteet	Työmaalla kahden ilmamäärämittauksen toisto tuotti luotettavia tuloksia
Tuotantonopeuden nostamiseksi valmistuksessa tehdään anostelutarkkuuden n. 3 % sisällä olevia virheitä	Betonin ilmamäärän ja puristuslujuuden välillä on luonteva riippuvuus	Betonin lujuus kehittyy lämpötilan funktiona, mitä voidaan arvioida erilaisten kypsyysikä arvioiden avulla	Tiheystulokset ovat hyvin vertailukelpoisia samassa mittauspisteessä, mutta valmistusketjun tasolla esiintyy hajontaa	Betoniin kehittyi uutta ilmaa keskimäärin yhteensä 2,5 % betoniasemalta valmiiseen rakenteeseen.
Betoni kiviaineksen kosteuden vaikutusta betoniin ei 100 % hallita	Betonin huokosrakenne ja kosteustila vaikuttaa betonin tiheyteen	Betonin tiivistystapa vaihtelee herkästi ja vaikuttaa betonin ominaisuuksiin	Puristuskoeekappaleen tasoitus hiomalla tai rikkilaastilla tuottaa toisistaan eroavia tuloksia	Tiheystulosten vertailukelpoisuudessa havaittiin ongelmia mittaustapojen välillä
Rakennusteollisuuden selvityksessä työmailla ei tunnisteta kaikkea nykyistä laadunvalvontakäytäntöä (kirjain ja numero-koodeja)	Betonin vesi/sementtisuhteen tunnetaan vaikuttavan hyvin suoraviivaisesti betonin lujuuteen	Puristuskoeekappaleiden kuivattaminen parantaa saatavaa puristuslujuustulosta	Paineekyllästyksellä määritetty ilmamäärä ei ole täysin sama suure kuin ilmamäärämittauksen tulos	Betonirakenteesta valitut näytteenottopisteet vaikuttavat tuloksiin havaitun erottumisilmiön kautta

## 7.3 Ehdotukset jatkotutkimuksen aiheista

1. Tiheyden eri määrittämenetelmien vertailukelpoisuutta ja herkkyyttä virheille tulisi tutkia tarkemmin laboratorio-olosuhteissa, joissa muuttujia voidaan hallita paremmin
2. Mittausohjelma tai osia siitä kannattaisi toistaa toisessa kohteessa saatujen tulosten arvioimiseksi ja yleisempien johtopäätösten muodostamiseksi. Betonin ominaisuuksien hajonnasta, ominaisuuksien keskinäisistä riippuvuuksista ja virheistä on mahdollista luotettavampi käsitys vastaavilla menettelyllä.
3. Betonin koostumuksen muutosta korkeussuuntaisessa poikkileikkauksessa tulisi tutkia ympäristössä, jossa voidaan sulkea pois raudoitukseen ja laatan kuormitukseen liittyvät tekijät. Ilmiön suuruutta voisi tarkastella myös suhteessa rakenteen kokonaiskorkeuteen ja valukerroksen paksuuteen.



## 8 Lähdeluettelo

- Al-Neshawy, F., & Punkki, J. 2017. *Stability of air-entrainment with PCE-superplasticizers*. In M. Tange Hasholt (Ed.), *Proceedings of the XXIII Nordic Concrete Research Symposium* (pp. 149-152). (Nordic concrete research). Norsk Betongforening.
- Al-Neshawy, F., & Punkki, J. 2017. *Securing the stable protective pore system of concrete - Report for "Robust Air" Research Project, 2017*. Helsinki: School of Engineering. 104 s. Aalto University publication series SCIENCE + TECHNOLOGY 10/2017. 978-952-60-7640-9.
- Al-Neshawy, F. 2018. *Quide for water pressure test*. Aalto University School of Engineering. 6s.
- By. 2017. *Betonin Puristuslujuuden selvittäminen valmiista rakenteesta porakappaleiden avulla*. Suomen Betoniyhdistys ry. 9 s. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa: [http://skolry.fi/sites/skol/files/by\\_ohje\\_betonin\\_puristuslujuuden\\_selvittaminen\\_valmiista\\_rakenteesta\\_por.pdf](http://skolry.fi/sites/skol/files/by_ohje_betonin_puristuslujuuden_selvittaminen_valmiista_rakenteesta_por.pdf)
- By. 2016. *BY65 Betoninormit 2016*. 2.painos. BY-Koulutus Oy. Suomen Betoniyhdistys ry. 164 s. ISBN 978-952-68068-4-6.
- By. 2004. *Betoniteknikan oppikirja, by201*. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys Ry, 570 s. ISBN 978-952-5075-61-8
- BY. 2018. *Betoniteknikan oppikirja 2018*. Kuudes päivitetty painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy. 568 s. ISBN 978-952-68619-4-4.
- B4. 2001. *Suomen rakentamismääräyskokoelma B4, betonirakenteet*. Helsinki. Ympäristöministeriö. 80 s.
- Dumitru, I., Song, T., Caprar, V. & Muklin V. 2016. *Compressive Strength of Concrete Cylinders by Sulphur, Rubber Capping and Grinding Methods*. Saatavissa: <http://www.pcte.com.au/images/pdf/utest-grinding/Dumitru-CIA09-capping-vs-grinding-paper.pdf>
- Gambhir, M. L. 2013. *Concrete technology: Theory and practice*. Fifth edition. New Delhi: McGraw Hill Education. 774s. ISBN 9-38-328654-7
- Haavisto, J. & Laaksonen, A. (2018): *Betonin puristuslujuus – Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista. Liikennevirasto, tekniikka- ja ympäristöosasto*. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2018. 71 sivua. ISBN 978-952-317-555-6.
- Kronlöf A, & Klami J. 2017. *Lausunto betonin vaatimuksenmukaisuuden valvonnasta ja soveltuvuudesta 2016 -2017 aikana havaittujen betonin lujuusongelmien perusteella*. Ympäristöministeriö. 9s. VTT Expert Services Oy VTT-S-03755-17.
- Liikennevirasto. 2016. *Siltabetonien P-lukumenettely*. [Verkkajulkaisu]. 19 s. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa: <http://> ISBN 978-952-317-297-5

*Liikennevirasto. 2018. Betonisiltojen lujuustutkimukset valmistuivat – yksi silta ei täytä vaatimuksia. [Verkkajulkaisu, lehdistötiedote]. 1s [Viitattu 7.10.2018] Saatavissa: <https://www.liikennevirasto.fi/-/betonisiltojen-lujuustutkimukset-valmistuivat-yksi-silta-ei-tayta-vaatimuksia#.W7oxNvZuKnQ>*

*Matala, S. 2016. Selvitys Kostamontien alikulkusillan betonin alilujuuteen vaikuttaneista syistä. Matla Consulting Oy. 12 s. [Viitattu 1.11.2017]. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/wp-content/uploads/2016/12/kostamontien-aks-kemijarvi.pdf>*

*Mehta, P & Monteiro, P. 2014. Concrete Microstructure, Properties and Materials. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Education. 675 s. ISBN 978-0-07-179787-0 (Mehta & Monteiro 2014)*

*Mäkikyrö, T. 2017. Selvitysmiehen loppuraportti ja suositukset 14.11.2017: Betonirakentamisen laatuketju kuntoon, taustalla vuoden 2016 lujuuskadot. Rakennusteollisuus RT. 169s. Saatavissa: <http://www.rakennusteollisuus.fi/betoniselvitys>*

*Neville, A. M. 1995. Properties of concrete. 4th ed. Harlow: Longman. 844s. ISBN 978-0-582-23070-5*

*Punkki, J. 2017. Betonin tiheyden hyödyntäminen laadunvalvonnassa siltapaikalla. Betoni- viidakko Oy. 16s.*

*Rakennustieto Oy. 2008. InfraRYL 2006: infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 3, Sillat ja rakennustekniset osat: sillat ja erittelemättömät betoni-, teräs- ja puurakenteet. Hämeenlinna: Karisto Oy. ISBN 978-951-682-882-7*

*SFS-EN 12350-3. 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 3: Puristuslujuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 8 s.*

*SFS-EN 12350-6. 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 6: Tiheys. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 9 s.*

*SFS-EN 12350-7. 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Painemenetelmät. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 18 s.*

*SFS-EN 12390-3. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus.*

*SFS-EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet. Näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus.*

*SFS-EN 13791. Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components.*

*Sweco Rakennetekniikka Oy. 2017. Sovellusohje betonin laadunvalvonnasta. Liikenneviraston ohjeen 18.11.2016 mukaisten vaatimusten soveltamisohje Tripla-hankkeen asema-lohkon betonivalujen toteutuksessa.*

*Vosahlik, J. 2018. Concrete pumping and its effect on the air void system. Materials and Structures, 51(4), pp. 1-15. ISSN 1871-6873.*

## Liiteluettelo

Liite 1. Tallennetut lämpötilaolosuhteet. 3 sivua.

Liite 2. Näytteenottopisteet. 1 sivua.

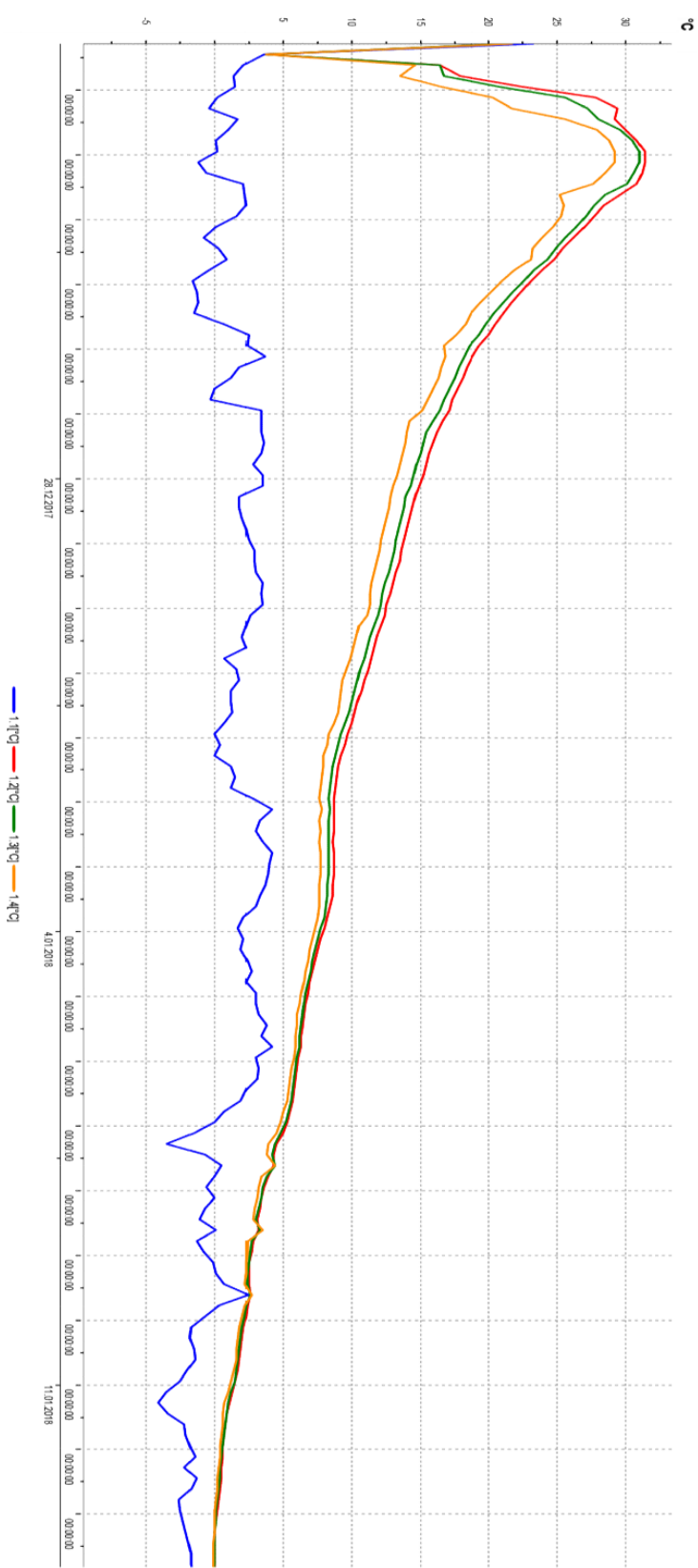
Liite 3. Luettelo rakennekoekappaleista. 1 sivua.

Liite 4. Valmisketjun eri vaiheissa määritetyt tiheydet. 1 sivua.

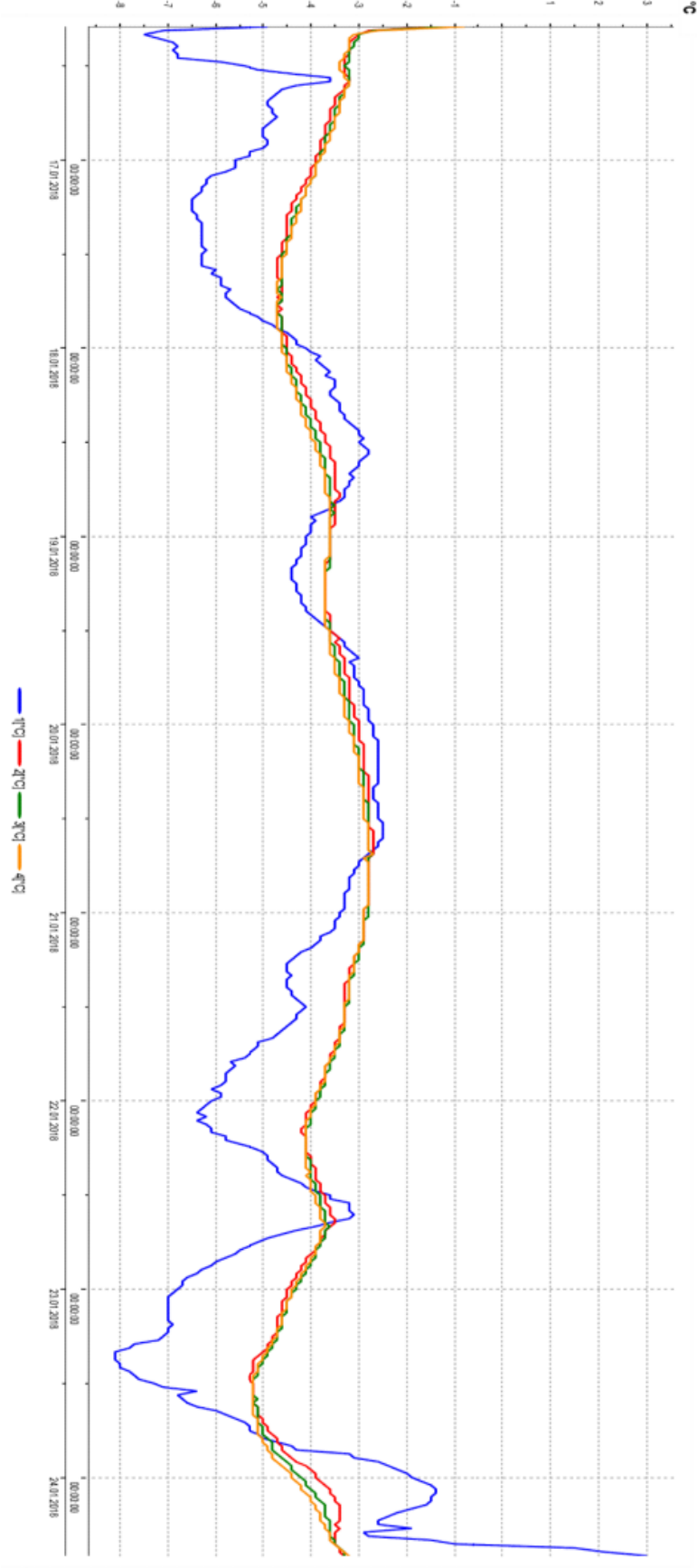
Liite 5. Laadunvalvontapöytäkirjat. 20 sivua.

Liite 1. Tallennetut lämpötilaolosuhteet

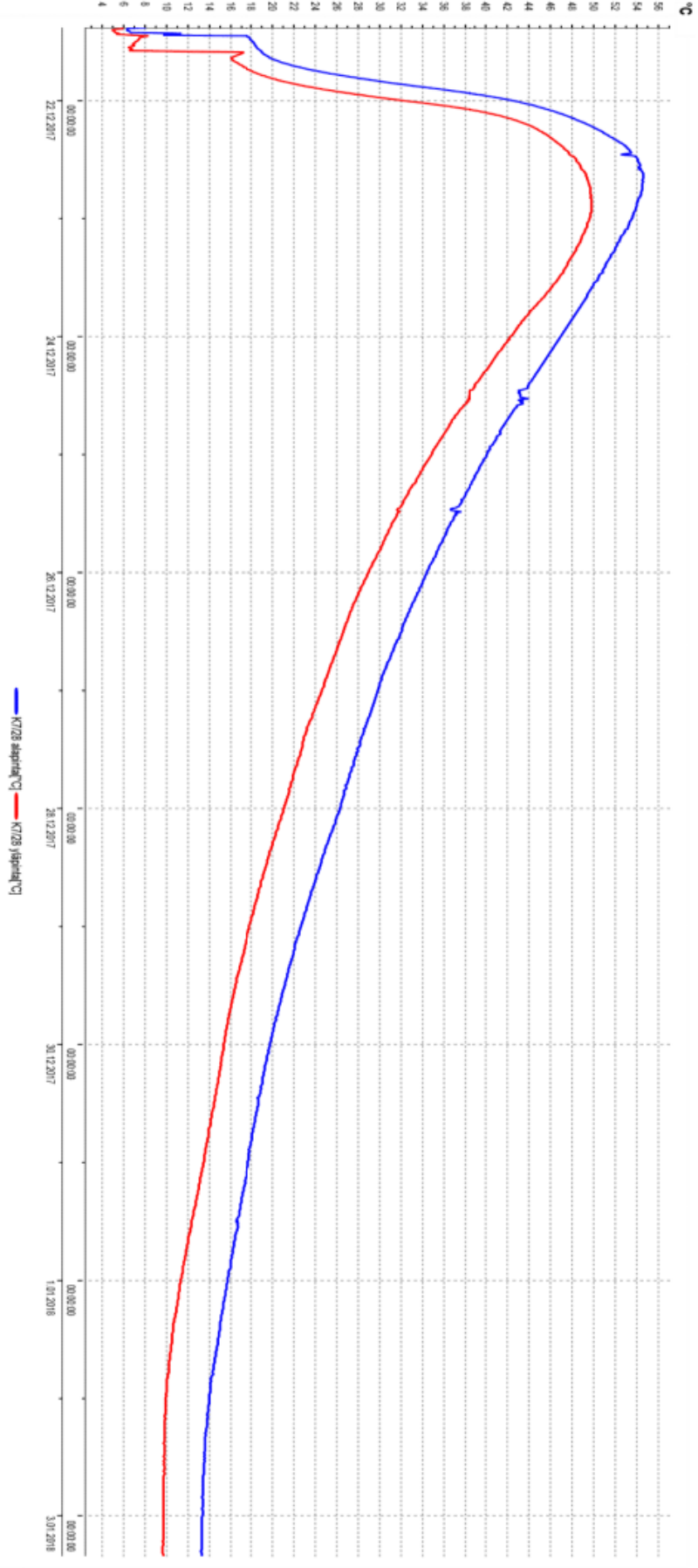
Instrument name: Ruskon Betoni Oy		16.1.2018 10:33:58		Page 1/1	
Start time: 21.12.2017 6:38:42		Minimum	Maximum	Mean value	Limit values
End time: 16.1.2018 6:38:42	1.1 [°C]	-7,60	23,30	0,565	-195,0/1000,0
Measurement channels: 4	1.2 [°C]	-3,00	31,40	9,864	-195,0/1000,0
Measured values: 157	1.3 [°C]	-3,00	31,00	9,522	-195,0/1000,0
SN 40714091	1.4 [°C]	-3,10	29,20	8,713	-195,0/1000,0
4 pisteen loggeri, Pasila					



Instrument name:		24.1.2018 10:28:55			Page 1/1	
Start time: 16.1.2018 7:01:09						
End time: 24.1.2018 10:01:09	1 [°C]	Minimum	Maximum	Mean value	Limit values	
Measurement channels: 4	2 [°C]	-8,10	3,00	-4,412	-195,0/1000,0	
Measured values: 391	3 [°C]	-5,30	-1,40	-3,754	-195,0/1000,0	
SN 40718519	4 [°C]	-5,20	-1,20	-3,772	-195,0/1000,0	
		-5,20	-0,80	-3,814	-195,0/1000,0	

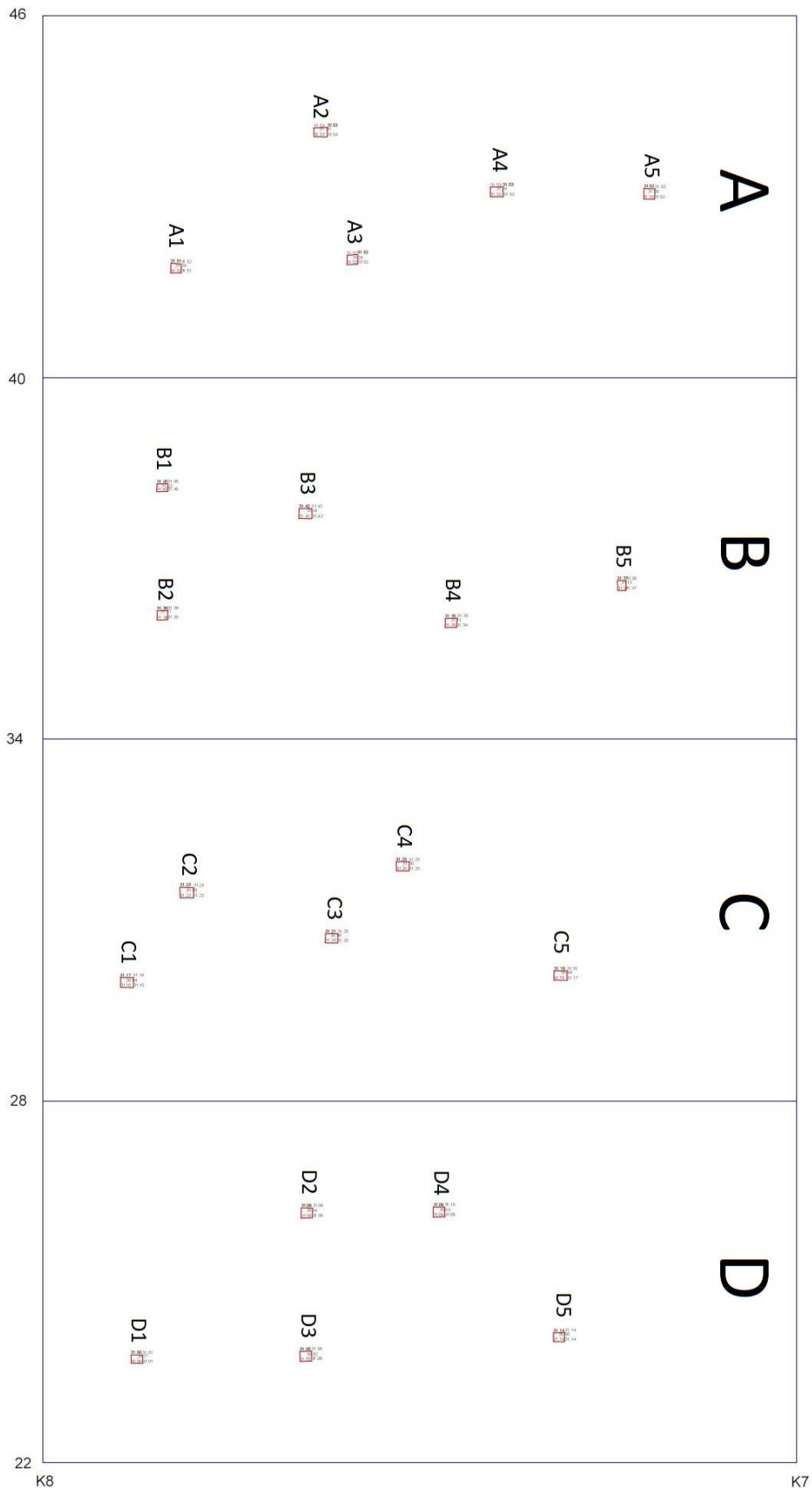


Instrument name: Timo Kantola YIT 2			3.1.2018 8:23:06		Page	1/1
Start time: 21.12.2017 9:12:56			Minimum	Maximum	Mean value	Limit values
End time: 3.1.2018 8:12:56	K7/28 alapinta [°C]		6,30	54,60	28,677	-195,0/1000,0
Measurement channels: 2	K7/28 yläpinta [°C]		4,90	49,80	23,823	-195,0/1000,0
Measured values: 1867						
SN 40717686						
Kannen levitys K7 / 28						





Liite 2. Näytteenottopisteet



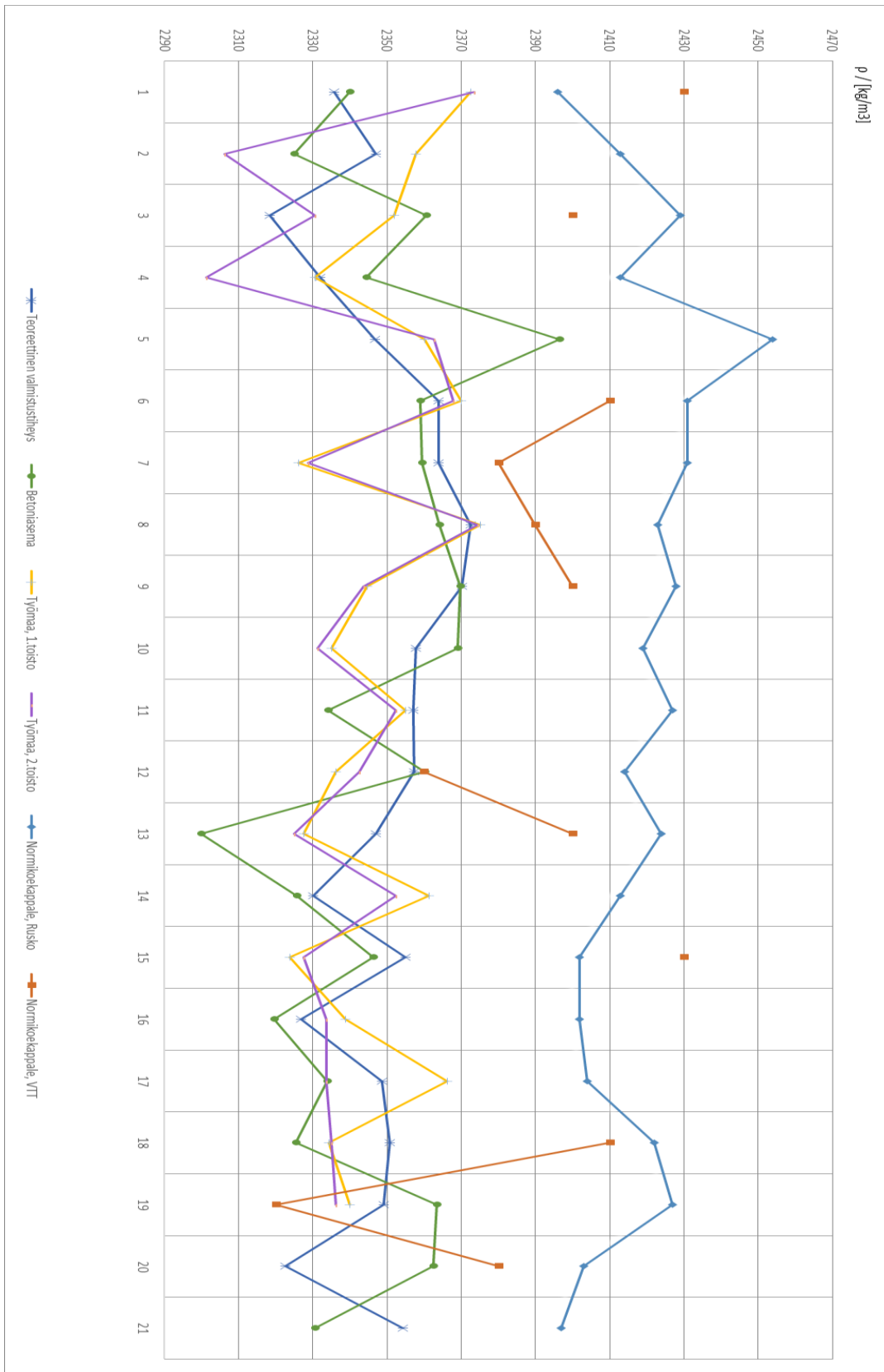
### Liite 3. Luettelo rakennekoekappaleista



Kappaletunnus	Lieriön korkeus [mm]	Huom. / poikkeama
A1	300	
A2	-	ei porattu
A3	300	
A4	302	
A4	-	ei porattu
B1	290	
B2	335	
B3	304	
B4	322	
B5	190+115	timanttiterä hajonnut
C1	314	alapinnan teräs
C2	312	teräkset jääneet lieriöön
C3	306	
C4	320	
C5	317	
D1	322	
D2	292	
D3	302	
D4	270+40	katkennut pohjateräksestä
D5	230+60	katkennut pohjateräksestä

Poraussuunnitelman mukaisia kappaleita A2 ja A5 ei voitu hyödyntää, sillä ne olivat yläpuolisten betonirakenteiden terästuennan ja telineiden alla, eikä porauskalustoa voitu käyttää.

## Liite 4. Valmisketjun eri vaiheissa määritetyt tiheydet



## **Liite 5. Laadunvalvontapöytäkirjat**

- *Työohje*
- *Betonilähetteen ja pumppauspöytäkirja*
- *Tutkimuspöytäkirjat*
- *Puristuskoe raportit*

## TYÖSUUNNITELMA AINEISTON KERÄÄMISEEN ASEMA-AUKION LEVENNYKSEN 1. VALUOSASTA

Tutkimuksessa tarkastellaan Pasilan asemakannen levennyksen valmistusprosessia (RA\_S\_TR01R449)

- Betonin valmistusketjusta otetaan näytteitä kolmesta pisteestä jokaisesta toimitetusta kuormasta.
- Työmaalla pyritään toimimaan mahdollisimman normaalisti.
- Työmaanäytteet otetaan ennen pumppausta työturvallisuussyistä.
- Ilmamäärämittaus tehdään painemittarimenetelmällä SFS-EN 12350-7 mukaisesti.
- Tiheyden mittaamiseen käytetään ilmamäärämittarin astiaa SFS-EN 12350-6 mukaisesti.
- Betonia ei tule fibrata yli astiasta kummassakaan mittauksessa.
- Tulokset kirjataan tavanomaisen valmistuksen ja työmaavalvonnan pöytäkirjoihin.

Asema-aukion levennys moduuleilla K7-K8/22-46 muodostaa 1. valuosan, jonka laajuus on n. 150m<sup>3</sup>

- Palkit 4x 29,7 m<sup>3</sup> & laatat 4x 7,6 m<sup>3</sup>
- Työmaalle toimitetaan arviolta 19 betonikuormaa.

Betoni Ro20 R2, C35/45-3 P30, 100v, S3, #16 ja #32 – norm. kovettuva sementti, ei seosaineita.  
Lämpötilahistoria tunnettava – yksi hyvin edustava loggeri rakenteeseen!

### 1. Betoniasemalla

Mitataan jokaisesta valmistetusta kuormasta (viimeisestä sekoitetusta annoksesta)

- Betonin ilmamäärä 0,1 % tarkkuudella
- Betonin tiheys 10 g tarkkuudella
- Tehdään lieriöön puristuskoekappale, joka koeistetaan 28 vrk ikäisenä Ruskon Betonilla Tuusulassa.

Sekoitus aika pidetään normaalina ja mahdollisimman muuttumattomana valun/tutkimuksen ajan.  
Kirjataan ylös valmistetut kuormanumerot annosraporttien keräämistä varten.

### 2. Työmaalla

- A. Mitataan jokaisesta saapuvasta kuormasta – ei kuorman alusta, vaan 1/3 ja 2/3 purun jälkeen
  - o Betonin ilmamäärä 0,1 % tarkkuudella
  - o Betonin tiheys 10 g tarkkuudella
- B. Tehdään lieriöön työmaakoekappaleet yhteensä 7 kuormasta: 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18
  - a. Säilytys työmaan varastossa normiolosuhteissa (+20 vedessä)
  - b. Koeistetaan normaaliprosessin mukana 28 vrk kuluttua valusta VTT Expert Servicessä / YIT.
- C. YIT dokumentoi työmaalla kuvaamalla, minne mikäkin kuorma pumpataan/puretaan
- D. Kirjataan betonilähetteen tarkasti auton työmaallaoloajat
- E. Mitataan lämpötilaolosuhteet loggerilla: ilman lämpötila + yksi laattaa edustava piste

### 3. Valmiista rakenteesta

Timanttiorataan rakennekappaleet 16 kpl (halkaisija = 100 mm, syvyys = 250 mm / 300 mm laatta)

- Näytteet pyritään poraamaan katkaisemalla kiilaamalla siten, että kannen alapinta jää ehjäksi
  - o Porataan 7 vrk kuluttua 8 näytettä, säilytetään normiolosuhteissa (+20 vedessä)
  - o Porataan 26 vrk kuluttua 8 näytettä
- Määritetään kappaleen tiheys massan perusteella ja tarvittaessa ilmamäärä ohuthieanalyysillä
- Porakappaleet koeistetaan omana eränään 28 vrk kuluttua valusta VTT Expert Servicessä / YIT.
  - o Samasta porakappaleesta valmistetaan kaksi puristuskappaletta, yksi ylä- ja yksi alapinnasta



Kuva 1 Poranäytteet (16 kpl) ensimmäisestä valuosasta (RA\_S\_TR01R449)

### Viranomaismääräykset ja ohjeet

Betonin valmistusketjussa on noudatettava betonin ja betonirakenteen valmistusta, työstämistä sekä laadunvalvontaa sääteleviä määräyksiä ja ohjeita.

- BY65 – 2016 Betoninormit
- Infra RYL
- Siltabetonien P-lukumenettely
- SFS – EN 1992 – 1-1+A1+AC Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu
- SFS – EN 206 Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimuksenmukaisuus
- SFS 7022 Betoni.
- SFS – EN 13670 Betonirakenteen toteutus
  
- SFS-EN 12350-3. 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 3: Puristuslujuus
- SFS-EN 12350-6. 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 6: Tiheys
- SFS-EN 12350-7. 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Painemenetelmät
- SFS-EN 12390-3. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus
- SFS-EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet
- SFS-EN 13791. Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components

Työmaan nimi/numero <i>Yit, Tripla</i>	Pumppuautonmerkki MB Putzmeister <i>46 m</i> <i>ENE 167</i>
<b>BETONIPUMPPUAUTON KÄYTTÖÖNOTTOTARKASTUS</b>	

Tarkastuskohde	OK	Puute/vika	Korjattu
Pumppuautolle suoritettu rakenteelliset tarkastukset			
- 12 kk:n tarkastukset	<input checked="" type="checkbox"/>		
- uusintatarkastukset			
- puutteet ja viat korjattu			
Mukana käyttö- ja huolto-ohjeet sekä muut tarvittavat asiapaperit	<input checked="" type="checkbox"/>		
Syöttöputkiston kunto	<input checked="" type="checkbox"/>		
Pääteletkun kiinnitys	<input checked="" type="checkbox"/>		
Puomin sylinterit	<input checked="" type="checkbox"/>		
Hydrauliikkaletkut ja -putkitus	<input checked="" type="checkbox"/>		
Näköyhteys valukohteeseen	<input checked="" type="checkbox"/>		
Pumppuauton tukemislaitteiden kunto	<input checked="" type="checkbox"/>		
Käyttöpaikka työmaasuunnitelman mukainen	<input checked="" type="checkbox"/>		
Työalustan maapohja ja alustan kantavuus	<input checked="" type="checkbox"/>		
Käyttöpaikan läheisyydessä olevat sähkölinjat ja johdot	<input checked="" type="checkbox"/>		
Alueella olevat kaivannot, maanalaiset rakenteet	<input checked="" type="checkbox"/>		
Liikennöidyt alueet, kulkureitit	<input checked="" type="checkbox"/>		
Sääolosuhteet	<input checked="" type="checkbox"/>		
Muotin vahvuus, tuenta	<input checked="" type="checkbox"/>		
Korkeiden rakenteiden valu- ja nousunopeus	<input checked="" type="checkbox"/>		
Koneenkäyttäjän pätevyys	<input checked="" type="checkbox"/>		
Koneenkäyttäjän perehdytys työmaahan	<input checked="" type="checkbox"/>		
Putoamissuojus	<input checked="" type="checkbox"/>		
Varottavat rakenteet	<input checked="" type="checkbox"/>		

Laatimispäivämäärä

21.12.2017

Tarkastuksen tekijät

*Rasla*  
045-1133800

*Timo Kantola*





# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

PIIHATIE 15 • 90620 OULU • PUH. 0207 933 400 • FAX 0207 933 407  
ALV REK.

Rusko Pasila

Pumppausilmoitus

7914

Tilaaja

YIT Tripla

Laskutusosoite

116000201 / Kantola

Merkillä

Portti 6

Työmaaosoite

Pvm	Siirto	Km	Työ alkoi klo	Työ päättyi klo	Työ- tunnit	Bet. m³	Huomautukset
21.12	7h		6:00	17:00	11	194	PP yli 40
	ESIB valoi holvin n. 300m², Ulad, Kaarlo, Martin ja Taavi						
	46m pumppu						
					7:50		

A. Betoniasemalla (valk.) B. Liitetään laskuun (sin.) C. Kuljettajalle (kelt.) D. Vastaanottajalle (pun.)

Kuljettaja

Imu Pasi

Kuittaus

21.12.2017

7

Timo Kantola



## Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI

Puh. 0207 933 315

rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17952

Vastaanottaja

YIT TRIPLA

Laskutusosoite

YIT RAKENNUS OY TRIPLA

PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

TRIPLA FI6000201

Merkki

4

Asiakasnumero

BETONI

LUJUUS LK NOTK. MAX#

MAARA

C35/45 16 P30

K 45 1 83 16

8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEN I 42.5N 5P

TILATTU: 175.0

TOIMITETTU: 8.0

RASITUSLUOKAT P30

IKÄ 100 KLORIDIL. CI 0.2

LISÄAINEET:

MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISÄ: TALVILISA

Kuumabetoni

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☒



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	26 SUNDELL	PP YLI 40	7:50 — 9:10	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka		
		0-2 km		Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä m³
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	07.22	07.22		



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17953

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 16.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLOORIDIL. CI 0.2

Kuumabetoni

LISÄAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	47 ERKKI	PP YLI 40	810 - 825	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
		0-2 km		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	07.50	07.50		



VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



BUREAU VERITAS  
Certification



LUETTELO N:o

17954

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 24.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLOORIDIL. CI 0.2

Kuumabetoni

LISÄAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	48 KERMO	PP YLI 40	835 -	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
		0-2 km		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	08.14	08.14		





# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17955

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 12.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 36.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. CI 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri

PASILA

Auton tunnus

42 MAKILA

Valutapa

PP YLI 40

Purku

klo 08.55

Purkujakso

Tilauspvm

Tilaus klo

Matka

0-2

km

Palautusbetoni ☐ arvioitu määrä m<sup>3</sup>

Toimituspvm

21.12.2017

Valmistuksen aloitus

08.32

Perillä klo

08.32

Vastaanottaja



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17958

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 32# P30 K 45 1 S3 32 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 44.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. CI 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri

PASILA

Auton tunnus

28 SUNDELL

Valutapa

PP YLI 40

Purku

klo 11.35

Purkujakso

Tilauspvm

Tilaus klo

Matka

0-2

km

Palautusbetoni ☐ arvioitu määrä m<sup>3</sup>

Toimituspvm

21.12.2017

Valmistuksen aloitus

09.10

Perillä klo

09.10

Vastaanottaja



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17959

Vastaanottaja

Laskutusosoite  
YIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI

LUJUUS LK NOTK. MAX#

MAARA

C35/45 32# P30

K 45 1 S3 32

8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0

TOIMITETTU: 52.0

RASITUSLUOKAT P30

IKK 100

KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:

MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	47 ERKKI	PP YLI 40	955 — 1005	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka		
		0-2 km		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	09.31	09.31		



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17960

Vastaanottaja

Laskutusosoite  
YIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI

LUJUUS LK NOTK. MAX#

MAARA

C35/45 16 P30

K 45 1 S3 16

9.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0

TOIMITETTU: 61.0

RASITUSLUOKAT P30

IKK 100

KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:

MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	48 KERMO	PP YLI 40	1010 —	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka		
		0-2 km		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	09.49	09.49		





# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17961

Vastaanottaja: RIPLA

Laskutusosoite: RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MÄÄRÄ

C35/45 32# P30 K 45 1 83 32 12.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0

TOIMITETTU: 73.0

RASITUSLUOKAT P30

IKÄ 100

KLORIDIL. Cl 0.2

Kuumabetoni

LISÄAINEET:

MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISÄT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku	Purkujakso
PASILA	42 MAKILÄ	PP YLI 40	klo 10.35	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
		0-2 km		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	10.12	10.12		



VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17963

Vastaanottaja: RIPLA

Laskutusosoite: RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MÄÄRÄ

C35/45 32# P30 K 45 1 83 32 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0

TOIMITETTU: 81.0

RASITUSLUOKAT P30

IKÄ 100

KLORIDIL. Cl 0.2

Kuumabetoni

LISÄAINEET:

MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISÄT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku	Purkujakso
PASILA	26 SUNDELL	PP YLI 40	klo 11.00	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
		0-2 km		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	10.36	10.36		



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17964

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite, YHT. RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42,5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 89.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri PASILA	Auton tunnus 47 ERKKI	Valutapa PP YLI 40	Purku klo 1115 — 1130	Purkujakso
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka 0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm 21.12.2017	Valmistuksen aloitus 10.58	Perillä klo 10.58	Vastaanottaja	



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17965

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite, YHT. RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 32# P30 K 45 1 S3 32 9.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42,5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 98.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri PASILA	Auton tunnus 48 KERMO	Valutapa PP YLI 40	Purku klo 1130	Purkujakso
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka 0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm 21.12.2017	Valmistuksen aloitus 11.11	Perillä klo 11.11	Vastaanottaja	





# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17966

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite LÄHETYS-  
PAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 32# P30 K 45 1 S3 32 12.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 110.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLOORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku	Purkujakso
PASILA	42 MAKILA	PP YLI 40	klo 12.00	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka		
		0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	11.41	11.41		



Ruskon Betoni Oy  
VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17967

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite LÄHETYS-  
PAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 118.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLOORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku	Purkujakso
PASILA	26 SUNDELL	PP YLI 40	klo 12.00	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka		
		0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	12.04	12.04		





# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17970

Vastaanottaja: TRIPLA

Laskutusosoite: RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 32# F30 K 45 1 93 32 12.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N BR

TILATTU: 175.0

TOIMITETTU: 130.0

RASITUSLUOKAT F30

IKK 100

KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:

MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri PASILA	Auton tunnus 42 MAKILA	Valutapa PP YLI 40	Purku klo 12.55	Purkujakso
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka 0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm 21.12.2017	Valmistuksen aloitus 12.27	Perillä klo 12.27	Vastaanottaja	



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17971

Vastaanottaja: TRIPLA

Laskutusosoite: RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 32# F30 K 45 1 93 32 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N BR

TILATTU: 175.0

TOIMITETTU: 138.0

RASITUSLUOKAT F30

IKK 100

KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:

MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri PASILA	Auton tunnus 26 SUNDELL	Valutapa PP YLI 40	Purku klo 13.15	Purkujakso
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka 0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm 21.12.2017	Valmistuksen aloitus 12.52	Perillä klo 12.52	Vastaanottaja	



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17374

Vastaanottaja

Laskutusosoite  
YIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MÄÄRÄ  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 12.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 150.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. CI 0.2

Kuumabetoni

LISÄAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISÄT: TALVILISÄ

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	42 MAKILA	PF YLI 40	140	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä m <sup>3</sup>
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	13.16	13.16		



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17375

Vastaanottaja

Laskutusosoite  
YIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MÄÄRÄ  
C35/45 32# P30 K 45 1 S3 32 8.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 158.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. CI 0.2

Kuumabetoni

LISÄAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISÄT: TALVILISÄ

Huom.

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	29	PF YLI 40	1400	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä m <sup>3</sup>
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	13.42	13.42		





# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001-ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17977

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite VIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 32# P30 K 45 1 S3 32 12.00 m3

Sidaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 175.0 TOIMITETTU: 170.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLOORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA FORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku	Purkujakso
PASILA	42 MAKILA	FF YLI 40	klo 14.30	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka		
		0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	14.08	14.08		



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001-ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17978

Vastaanottaja TRIPLA

Laskutusosoite VIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 32# P30 K 45 1 S3 32 8.00 m3

Sidaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 190.0 TOIMITETTU: 178.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLOORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

LISAT: TALVILISA

Huom.

KANTOLA FORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐



Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku	Purkujakso
PASILA	29	FF YLI 40	klo 14.50	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka		
		0-2 km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä	m <sup>3</sup>
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	14.27	14.27		



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17981

Vastaanottaja

Laskutusosoite  
VIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 12.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 190.0 TOIMITETTU: 190.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

Huom

LISAT: TALVILISA

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	42 MAKILA	PP YLI 40	5.15	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä m <sup>3</sup>
		0-2		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	14.55	14.55		



# Ruskon Betoni Oy

VALMISBETONITEHDAS

Veturitie 13 00240 HELSINKI  
Puh. 0207 933 315  
rb.pasila@ruskonbetoni.fi

Alv rek.



ISO 9001 - ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification



4. VASTAANOTTAJA

LÄHETYS-  
LUETTELO N:o

17982

Vastaanottaja

Laskutusosoite  
VIT RAKENNUS OY TRIPLA  
PL 4900 00002 HELSINKI

Toimitusosoite

Merkki

TRIPLA FI6000201

4

Asiakasnumero

BETONI LUJUUS LK NOTK. MAX# MAARA  
C35/45 16 P30 K 45 1 S3 16 4.00 m3

Sideaine/Seosaineet

CEM I 42.5N SR

TILATTU: 194.0 TOIMITETTU: 194.0  
RASITUSLUOKAT P30 IKA 100 KLORIDIL. C1 0.2

Kuumabetoni

LISAAINEET:  
MASTERSKY600 0.80% MASTER AIR 0.02%

Huom

LISAT: TALVILISA

KANTOLA PORTTI 6  
R020R2

Pumppausputkiston voitelu ☐

Vastaanottajaa pyydetään tarkastamaan, että kuormakirjan merkinnät ovat oikeat.

Mylläri	Auton tunnus	Valutapa	Purku klo	Purkujakso
PASILA	26 SUNDELL	PP YLI 40	5.15	
Tilauspvm	Tilaus klo	Matka	km	Palautusbetoni <input type="checkbox"/> arvioitu määrä m <sup>3</sup>
		0-2		
Toimituspvm	Valmistuksen aloitus	Perillä klo	Vastaanottaja	
21.12.2017	15.37	15.37		



## BETONIN VALMISTUS – ASEMA-AUKION LEVENNYS 1. VALUOSA

Tutkimuksessa seurataan Pasilan asemakannen levennyksen betonin valmistusprosessia (RA\_S\_TR01R449)

- Betonin valmistusketjusta otetaan näytteitä kolmesta pisteestä jokaisesta toimitetusta kuormasta.
- Betoniasemalla pyritään toimimaan mahdollisimman normaalisti.
- Ilmamäärämittaus tehdään painemittarimenetelmällä SFS-EN 12350-7 mukaisesti.
- Tiheyden mittaamiseen käytetään ilmamäärämittarin astiaa SFS-EN 12350-6 mukaisesti.
- Betonia ei tule fibrata yli astiasta kummassakaan mittauksessa.
- Tulokset kirjataan tavanomaisen valmistuksen ja työmaavalvonnan pöytäkirjoihin.

### 1. Betoniasemalla

Mitataan jokaisesta valmistetusta kuormasta (viimeisestä sekoitetusta annoksesta)

- Betonin ilmamäärä 0,1 % tarkkuudella
- Betonin tiheys 10 g tarkkuudella
- Tehdään lieriöön puristuskoekappale, joka koeistetaan 28 vrk ikäisenä Ruskon Betonilla Tuusulassa.
  - o **tunnus AAL + juokseva numero 1,2,3... + kuormakirjan numero**

Sekoitus aika pidetään normaalina ja mahdollisimman muuttumattomana valun/tutkimuksen ajan.

Kirjataan ylös valmistetut kuormanumerot annosraporttien keräämistä varten.

NRO	Kuormakirja	Sekoitus aika	Huom. poikkeavaa valmistuksessa
1 RAE 16	KK 17952	126 sek	18720g tiheys/ 17,3 C lämpö / 4% ilma
2 # 16	KK 17953	188 sek	18600g / 14,1 C / 4,6% (Tarkasteltu huokostinta)
3 # 16	KK 17954	141 sek	18886g / 12,9 C / 3,9% (Tarkasteltu huokostusta + C)
4 # 16	KK 17955	120 sek	18755g / 14,5 C / 3,6%
5 # 32	KK 17958	135 sek	19173g / 15 C / 3,5%
6 # 32	KK 17959	120 sek	18872g / 15,7 C / 3,3%
7 # 16	KK 17960	120 sek	18875g / 15,2 C / 3,5%
8 # 32	KK 17961	123 sek	18914g / 14,4 C / 3,8%
9 # 32	KK 17963	133 sek	18958g / 14,5 C / 3,8%
10 # 16	KK 17964	120 sek	18952g / 14,5 C / 3,5%
11 # 32	KK 17965	120 sek	18674g / 15,9 C / 3,3%
12 # 32	KK 17966	127 sek	18882g / 15,4 C / 3,5%
13 # 16	KK 17967	161 sek	18400g / 17,1 C / 3,7%
14 # 32	KK 17970	147 sek	18606g / 15,1 C / 4%
15 # 32	KK 17971	120 sek	18770g / 16 C / 3,5%
16 # 16	KK 17974	125 sek	18557g / 15,7 C / 4,2%
17 # 32	KK 17975	131 sek	18671g / 14,6 C / 3,6%
18 # 32	KK 17977	120 sek	18604g / 16 C / 3,8%
19 # 32	KK 17978	130 sek	18907g / 15,1 C / 4%
20 # 16	KK 17981	139 sek	18900g / 16,8 C / 3,9%
21 # 16	KK 17982	163 sek	18645g / 16,5 C / 3,7%

Tilaaja / Vastaava Kantola Timo

Työnumero: FI6000201

Paikka: Aseman kansi

Työmaallaoloaika - yht.

Päivämäärä	tunnus / kk	Betonilaatu/ P-luku	Lämpötila	Ilmamäärä %	Painuma cm	Levlämä cm	Koekappale
21.12.2017	17964	K45 P30		5,3			
21.12.2017	17965	K45 P30		5			
21.12.2017	17966	K45 P30		4,9			1
21.12.2017	17967	K45 P30		5,2			1
21.12.2017	17970	K45 P30		4,6			
21.12.2017	17971	K45 P30		5			1
21.12.2017	17977	K45 P30		4,6			1
21.12.2017	17978	K45 P30		4,8			1
21.12.2017	17952	K45 P30		5,2			1
21.12.2017	17954	K45 P30		5,4			1
21.12.2017	17959	K45 P30		4,9			1
21.12.2017	17960	K45 P30		5,3			1
21.12.2017	17961	K45 P30		4,8			1
21.12.2017	17963	K45 P30		5,4			1

E1  
SAA  
HUKATA

El laskuteta  
labraa.  
Kartolalle LIVIA  
varten lahetetty.  
Puhtaaksi kirjoitus  
ja P-luku laskelma  
viikko 52

Tilaaaja / Vastaava: KANTOLA  
 Työnumero: F16000201  
 Paikka: Aseman kans.  
 Työmaallaoloaika: \_\_\_\_\_ yht. \_\_\_\_\_

Päivämäärä	tunnus / kk	Betonilaatu/ P-luku	Lämpötila	Ilmamäärä %	Painuma cm	Leviämä cm	Koekappale	Tiheys
1/3	2112	17952		5,2	2		1	18980 =
2/3	-11-	17952		5,1				18989 =
1/3	-11-	17953		5,3	20			18862 =
2/3	-11-	17953		5,1				18450 =
1/3	-11-	17954		5,4			1	18815 =
2/3	-11-	17954		5,0				18654 =
1/3	-11-	17955		5,2				18645
2/3	-11-	17955		5,2				18210
1/3	-11-	17958		5,2	21			18881
2/3	-11-	17958		5,4				18902
1/3	-11-	17959		4,9			1	18960
2/3	-11-	17959		5,1				18943
1/3	-11-	17960		5,3			1	18610
2/3	-11-	17960		5,7				18631
1/3	-11-	17961		4,8			1	19002
2/3	-11-	17961		5,0				18995
1/3	-11-	17963		5,4			1	18758
2/3	-11-	17963		5,3				18750
1/3	-11-	17964		5,3				18680

Yhteensä:							
-----------	--	--	--	--	--	--	--

Muuta: \_\_\_\_\_  
 Päiväys: 21.12.2017  
 Suorittaja: MP



Tilaja / Vastaava: KANTOLA  
 Työnumero: F16000201  
 Paikka: Aseman kansi  
 Työmaallaoloaika: \_\_\_\_\_ yht. \_\_\_\_\_

	Päivämäärä	tunnus / kk	Betonilaatu/ P-luku	Lämpötila	Ilmamäärä %	Painuma cm	Levlämä cm	Koekappale	Tiheys
2/3	21.12	17964			5.3				18650
1/3	-11-	17965			5				18840
2/3	-11-	17965			4.8				18820
1/3	-11-	17966			4.9				18690
2/3	-11-	17966			4.8			1	18740
7/3	-11-	17967			5.2			1	18620
2/3	-11-	17967			5.3			1	18600
1/3	-11-	17970			4.6				18890
2/3	-11-	17970			4.9	21cm			18820
1/3	-11-	17971			5.3				18590
2/3	-11-	17971			5.0			1	18630
	-11-								<del>18630</del>
7/3	-11-	17974			4.9				18710
2/3	-11-	17974			5.2				18670
1/3	-11-	17975			5.0				18930
2/3	-11-	17975			5.3				18790
1/3	-11-	17977			4.5				18675
2/3	-11-	17977			4.6			1	18680
1/3	-11-	17978			4.8			1	18720
2/3	-11-	17978			5.0				18690
Yhteensä:									

Muuta: \_\_\_\_\_  
 Päiväys: 21.12.2017  
 Suorittaja: UP





## BETONIN VALMISTUS – ASEMA-AUKION LEVENNYS 1. VALUOSA

Tutkimuksessa seurataan Pasilan asemakannen levennyksen betonin valmistusprosessia (RA\_S\_TR01R449)

- Betonin valmistusketjusta otetaan näytteitä kolmesta pisteestä jokaisesta toimitetusta kuormasta.
- Betoniasemalla pyritään toimimaan mahdollisimman normaalisti.
- Ilmamäärämittaus tehdään painemittarimenetelmällä SFS-EN 12350-7 mukaisesti.
- Tiheyden mittaamiseen käytetään ilmamäärämittarin astiaa SFS-EN 12350-6 mukaisesti.
- Betonia ei tule fibrata yli astiasta kummassakaan mittauksessa.
- Tulokset kirjataan tavanomaisen valmistuksen ja työmaavalvonnan pöytäkirjoihin.

### 1. Betoniasemalla

Mitataan jokaisesta valmistetusta kuormasta (viimeisestä sekoitetusta annoksesta)

- Betonin ilmamäärä 0,1 % tarkkuudella
- Betonin tiheys 10 g tarkkuudella
- Tehdään lieriöön puristuskoeappale, joka koeistetaan 28 vrk ikäisenä Ruskon Betonilla Tuusulassa.
  - o tunnus AAL + juokseva numero 1,2,3... + kuormakirjan numero

Sekoitus aika pidetään normaalina ja mahdollisimman muuttumattomana valun/tutkimuksen ajan.

Kirjataan ylös valmistetut kuormanumerot annosraporttien keräämistä varten.

NRO	Kuormakirja	<del>Sekoitus aika</del>	Huom. poikkeavaa valmistuksessa
1	17952		
2	17953		
3	17954		
4	17955		
5	17958		
6	17959		
7	17960		
8	17961		
9	17963		
10	17964		
11	17965		
12	17966		
13	17967		
14	17970		
15	17971		
16	17974		
17	17975		
18	17977		
19	17978		
20	17981		
21	17982		

Astia ~~40125~~ 42485  
18728 Stihcs

18600

18986

18755

19173

18672

18875

18914

18954

18952

18674

18882

18400

18606

18770

18557

18671

18604

18907

18900

ilm 4.0%

4.6%

3.6%

3.3%

3%

3.3%

3.5%

3.8%

3.8%

2.5%

3.2%

3.2%

3.7%

4%

3.5%

4.2%

3.6%

3.8%

4.0%

3.9

C 17.8

C° 14.9

C° 12.4

C° 15.3

C° 14.2

C° 14.3

C° 13.6

C° 14.6

C° 13.6

C° 12.6

C° 14.9

14.8°C

16.7°C

14.3°C

15.8°C

16°C

13.5°C

16

13°C

17°C

**Tilaaaja** YIT Rakennus Oy / Tripla  
PL 36  
00621 HELSINKI

**Tilaus** Näytteet noudettu: 16.1.2018

**Yhteyshenkilö** VTT Expert Services Oy  
Vastaava testaaaja Jarl Lindholm  
PL1001  
02044 VTT  
puh.0207226963

**Tehtävä** SFS-EN 12390-3. Betoni. Koekappaleiden puristuslujuus

**Näytteet** Betonikoekappaleet, 6 kpl

**Näytteenottopaikka** Tripla

**Valmisbetonitehdas**

**Lisätietoja**

TILAAJAN ILMOITTAMAT TIEDOT				TULOKSET				
Tunnus	Valmistus-päivä	Lujuus-luokka	Ikä vrk	Lujuus MN/m <sup>2</sup>	Voima kN	Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Muoto ja mitat mm	Testaus-päivä
M390	21.12.2017		28	65,3	949	2430	L150x298	18.1.2018
M391	21.12.2017		28	60,7	892	2400	L150x299	18.1.2018
M392	21.12.2017		28	56,0	813	2410	L150x301	18.1.2018
M393	21.12.2017		28	59,1	867	2380	L150x300	18.1.2018
M394	21.12.2017		28	57,9	846	2390	L150x301	18.1.2018
M395	21.12.2017		28	56,6	824	2400	L150x298	18.1.2018

Lieriökoekappaleiden 150x300 ja särmältään 100 ja 200 mm kuutiokoekappaleiden puristuslujuudet on muunnettu RakMK B4:n mukaisesti särmältään 150 mm kuutiokoekappaleen puristuslujuudeksi. L = lieriö, K = kuutio, l) = nimetyt mitat. Tiheyden määrittäminen: toimitustilassa / mitatut mitat.

Espoo 18.1.2018



Jarl Lindholm  
Vastaava testaaaja



Jarkko Klami  
Asiantuntija

**Jakelu** Tilaaaja, alkuperäinen  
Arkisto, alkuperäinen

**Tilaaaja** YIT Rakennus Oy / Tripla  
PL 36  
00621 HELSINKI

**Tilaus** Näytteet noudettu: 16.1.2018

**Yhteyshenkilö** VTT Expert Services Oy  
Vastaava testaaaja Jarl Lindholm  
PL1001  
02044 VTT  
puh.0207226963

**Tehtävä** SFS-EN 12390-3. Betoni. Koekappaleiden puristuslujuus

**Näytteet** Betonikoekappaleet, 6 kpl

**Näytteenottopaikka** Tripla


**Valmishbetonitehdas**

**Lisätietoja**

TILAAJAN ILMOITTAMAT TIEDOT				TULOKSET				
Tunnus	Valmistus-päivä	Lujuus-luokka	Ikä vrk	Lujuus MN/m <sup>2</sup>	Voima kN	Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Muoto ja mitat mm	Testaus-päivä
M396	21.12.2017		28	57,6	841	2360	L150x302	18.1.2018
M397	21.12.2017		28	59,3	871	2400	L150x301	18.1.2018
M398	21.12.2017		28	66,4	950	2430	L149x301	18.1.2018
M399	21.12.2017		28	58,9	864	2410	L150x300	18.1.2018
M400	21.12.2017		28	56,6	824	2320	L150x300	18.1.2018
M401	21.12.2017		28	60,0	883	2380	L150x301	18.1.2018

Lieriökoekappaleiden 150x300 ja särmältään 100 ja 200 mm kuutiokoekappaleiden puristuslujuudet on muunnettu RakMK B4:n mukaisesti särmältään 150 mm kuutiokoekappaleen puristuslujuudeksi. L = lieriö, K = kuutio, l) = nimetyt mitat. Tiheyden määrittäminen toimitustilassa / mitatut mitat.

Espoo 18.1.2018

  
Jarl Lindholm  
Vastaava testaaaja

  
Jarkko Klami  
Asiantuntija

**Jakelu** Tilaaaja, alkuperäinen  
Arkisto, alkuperäinen